SCIENCES ET AVENIR
La Recherche

© B.DECOUT/REA - PESHKOVA/SHUTTERSTOCK

avec le professeur
Stanislas Dehaene
Neuroscientifique
au Collège de France

Mémoire • Langage • Attention

LES SUPER POUVOIRS DU CERVEAU

OCTOBRE 2021 | N° 896 | ALLEMAGNE 7,40 € / AUTRICHE 6,50 € / ITALIE 5,70 € / LUXEMBOURG 5,70 € / GRÈCE 5,70 € / BELGIQUE 5,70 € / ESPAGNE 5,70 € / DOM 5,90 € / DOM-AVION 7,90 € / ANDORRE 5,40 € / PORTUGAL 5,70 € / TOM 800 XPF / ÎLE MAURICE : 8,60€ / TOM (AVION) 1500 XPF / SUISSE 9,50 CHF / TUNISIE 10 TND / MAROC 55 DH / CANADA-USA 8,20 $

L 13418 - 896 - F: 5,30 € - RD

IA L'armée des robots soldats

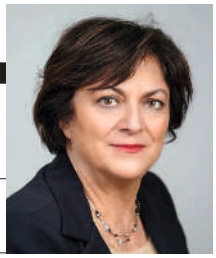
SCIENCES ET AVENIR / LA RECHERCHE - N° 896 - OCTOBRE 2021 - LES SUPER POUVOIRS DU CERVEAU

PERRINE LAFFONT
CHAMPIONNE OLYMPIQUE DE SKI DE BOSSES & 4 FOIS VICTORIEUSE DE LA COUPE DU MONDE.

MGEN, Mutuelle Générale de l'Éducation Nationale, immatriculée sous le numéro SIREN 775 685 399, MGEN Vie, immatriculée sous le numéro SIREN 441 922 002, MGEN Filia, immatriculée sous le numéro SIREN 440 363 588, mutuelles soumises aux dispositions du livre II du Code de la mutualité. MGEN Action sanitaire et sociale, immatriculée sous le numéro SIREN 441 921 913, MGEN Centres de santé, immatriculée sous le numéro SIREN 477 901 714, mutuelles soumises aux dispositions du livre III du Code de la mutualité. Siège social : 3 square Max Hymans -75748 PARIS CEDEX 15.

www.antigel.agency - 02326 - Juin 2021 - © Hervé Thouroude - Document publicitaire n'ayant pas de valeur contractuelle.

Dominique Leglu
Directrice éditoriale



BERNARD MARTINEZ

Pour une stratégie mondiale en santé

Retour à la normale ? Toute la société bouleversée par la pandémie y aspire, même si l'expression n'a pas beaucoup de sens, comme le pense tout médecin ou sociologue qui sait que la maladie et les confinements ont forcément transformé les esprits. Ceux des scientifiques, à coup sûr, ont été affectés. On les voit s'interroger collectivement (en anglais) sur leur propre action : *« What's the new normal ? »* Autrement dit : Quelle nouvelle normalité en recherche et développement (R&D) pour affronter de prochaines crises ? La question a été au cœur de débats internationaux sur la médecine et sur le climat, organisés récemment par le réseau Science Business, qui fait dialoguer universitaires, décideurs en matière de recherche et d'innovation, et entreprises.

Vital échange des idées. La conception ultrarapide par des chercheurs de pointe des nouveaux vaccins à ARN messager, puis leur mise à disposition par de puissants laboratoires pharmaceutiques — mais de façon inéquitable à travers la planète — a joué le rôle de déclencheur. Comment coopérer en R&D pour disposer des meilleures armes dans une crise ? Dans la tradition scientifique, l'échange des idées est vital. C'est ainsi qu'avance la science. Renoncer à la coopération au niveau international n'est pas une option, répètent ceux qui œuvrent en recherche fondamentale. Même si la compétition ultérieure se fait rude.

Génomique rapide. Ainsi, comment aider à la lutte contre le réchauffement planétaire, si ce n'est par des échanges entre tous les spécialistes pour livrer le point le plus exact sur l'évolution du climat, comme le réalise le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec) ? Ou comme l'ont fait, début septembre à Marseille, les congressistes de l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN) au sujet des espèces et de la biodiversité menacées. En ce qui concerne la pandémie, les scientifiques se réjouissent de la rapidité avec laquelle, dès ses débuts, a circulé l'information dans le domaine crucial de la génomique. De la Chine à la France, du Royaume-Uni à l'Afrique du Sud, l'Inde ou les États-Unis. Pour le bien de tous.

Climat et santé. Mais on ne saurait se contenter de ce satisfecit conjoncturel. C'est ce qu'exprime clairement Victor Dzau, président de l'académie de médecine des États-Unis, pour qui le système mondial de R&D est par trop fragmenté. Sans oublier que nombre de pays n'y accèdent même pas. Et d'appeler de ses vœux une réunion au plus haut niveau des chefs d'Etat ou de gouvernement pour établir un « Conseil mondial sur les menaces pour la santé ». Aucun hasard si plus de 200 journaux médicaux à travers le monde, dans un éditorial volontairement commun — c'est une première — viennent de pousser un cri d'alarme sur les nouvelles menaces que fait déjà courir le réchauffement du climat pour la santé humaine. Car la crise a commencé et le constat est là : il manque une stratégie mondiale avec une vraie coordination. ■ @dominiqueleglu

COURRIER

Courriels à : **courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr**

Sécheresse

Dans *S. et A.* n° 893/894, vous indiquez p. 14 qu'il existe un risque de sécheresse et de restrictions d'eau, en lien avec un été plus chaud et plus sec que la normale. Or on peut qualifier cet été d'un terme peu scientifique : « pourri », et cela jusqu'au 15 août. Il est normal d'essayer de prévoir la tendance météo, mais peut-on parler de données fiables et sur quoi sont-elles basées ?

Pierre André

S. et A. : Chaque mois des experts de Météo France et du programme Mercator de surveillance des océans élaborent des prévisions saisonnières à trois mois. Ce sont des probabilités qui s'appuient cependant sur des modèles établis à partir de mesures telles que la température de surface des océans. Pour les prévisions de mai, juin et juillet, il n'y avait pas de scénario privilégié pour le quart nord-ouest de la France mais un « chaud probable » sur le reste de la France, qui ne s'est avéré exact que pour le quart sud-est. Cette probabilité était établie à 50 %, soit une marge d'erreur importante dont il faut tenir compte.

Gare à la fausse morille

L'article « Un champignon lié à des cas de maladie de Charcot » (*S. et A.* n° 895) m'inquiète car en Lozère, j'en ai mangé lors d'un repas de famille en pensant que c'était des morilles…

Nathalie Jollivet

S. et A. : L'étude montre un lien entre consommation de *Gyromitra gigas* et maladie de Charcot (SLA), mais on ne connaît pas les conditions réelles de développement de celle-ci. Il est probable que plusieurs consommations du champignon soient nécessaires pour la déclencher. Les modalités d'apparition de la SLA, souvent sporadiques, restent mystérieuses.

Erratum

Dans l'interview de Roberto Neri (*S. et A.* n° 895, p. 10), le trou noir M87* n'est pas situé dans notre galaxie, comme cela a été ajouté par erreur, mais bien au centre de la galaxie M87.

DISPARITION

Frank Mietton

C'est avec une immense tristesse que nous avons appris le décès brutal de notre collaborateur Frank Mietton. En tant que premier secrétaire de rédaction, c'est lui qui, depuis 23 ans, traquait fautes de français, imprécisions terminologiques et jusqu'à la plus petite approximation dans les articles de nos journalistes. La réputation de rigueur de *Sciences et Avenir* lui doit beaucoup. Mais Frank était bien plus qu'un grand professionnel. Pour nombre d'entre nous, c'était un ami. Sa grande culture, son humour et son insatiable curiosité poussaient chacun à donner le meilleur de lui-même. Pour reprendre les mots de sa compagne, « *passionné d'histoire, Frank aidait à comprendre le monde qui vient* ». Une qualité tellement essentielle pour garantir le sérieux d'un journal comme *Sciences et Avenir*. Son départ laisse un vide immense. À sa compagne Annie et à ses deux fils, Quentin et Léo, toute l'équipe du journal adresse ses plus sincères condoléances. **M. N.**

BERNARD MARTINEZ

ÉDITO

Mathieu Nowak
Rédacteur en chef

Apprendre à apprendre

Apprendre : une capacité innée ? Certes, c'est tout naturellement que l'enfant apprend à parler ou à marcher. Mais si chaque cerveau humain se développe avec le « super-pouvoir » de l'apprentissage, ses capacités peuvent être décuplées, à tout âge, avec quelques efforts bien sentis. *« J'ai identifié quatre fonctions cérébrales majeures qui maximisent la vitesse à laquelle nous apprenons »*, nous dit Stanislas Dehaene. Professeur au Collège de France, cet éminent neuropsychologue, qui préside aussi le Conseil scientifique de l'Éducation nationale, sera notre guide dans ce dossier exceptionnel qui révèle que l'on peut *« apprendre à apprendre »*. Sa lecture aide à mieux connaître le fonctionnement du cerveau au regard des plus récents travaux scientifiques. Pour optimiser ses performances, nous avons identifié 7 clés. Nous vous les détaillons en vous livrant aussi des astuces de scientifiques et autres champions de la mémorisation. *« Il faut avoir confiance dans sa capacité cérébrale »*, insiste Stanislas Dehaene, qui est supérieure à n'importe quelle intelligence artificielle.

> « Pour optimiser les performances du cerveau humain, nous avons identifié 7 clés, que nous vous détaillons dans ce numéro »

Ce numéro de *Sciences et Avenir* est aussi l'occasion d'introduire quelques évolutions pour toujours mieux répondre à vos attentes. Vous trouverez ainsi des pages actualité renforcées, qui vous donneront chaque mois un panorama complet — et sans équivalent dans la presse scientifique francophone — des dernières avancées en sciences fondamentales, en nature, en santé et en histoire. Ensuite, nous vous invitons à explorer des domaines en constante évolution dans des articles plus longs, toujours plus fouillés. Vous découvrirez ainsi ce mois-ci les astres les plus étranges de l'univers, les étoiles à neutron, qui abritent probablement de la matière sous une forme différente de tout ce que nous connaissons. Vous apprendrez tout ce que les groupes sanguins disent de nous et leur incroyable diversité sur Terre. Et en ces temps de cri d'alarme climatique à la suite de la publication du dernier rapport du Giec, nous vous présenterons une lueur d'espoir nouvelle, une cible inédite qui représente un véritable joker dans la lutte contre le réchauffement : la traque des fuites de méthane. Bonne lecture et n'hésitez pas à nous écrire pour nous faire part de vos remarques. Nous avons toujours à apprendre ! ■ @mathieu_nowak

SCIENCES ET AVENIR La Recherche

SERVICE ABONNEMENT
et anciens numéros
Tél. : 01.55.56.71.48
Sciences et Avenir 45, avenue du Général-Leclerc 60643 Chantilly cedex
abonnements@sciencesetavenir.fr

Tarif des abonnements : France, 1 an simple (12 numéros dont un double) : 35 €. 1 an complet (12 numéros dont un double + 4 hors-séries) : 48 €. Étranger : nous consulter.
Abonnements Belgique : Edigroup : tél. 00.32.70.233. 304
Abonnements Suisse : Edigroup : tél. 00.41.22.860.84.01

Pour joindre la rédaction :
41 bis, avenue Bosquet 75007 Paris
Tél. : 01.55.35.56.01.
E-mail : redaction@sciencesetavenir.fr
Site Internet : sciencesetavenir.fr

Directrice éditoriale Dominique LEGLU - 01.55.35.56.02
Directrice de la rédaction Carole CHATELAIN - 01.55.35.56.57
assistée de Valérie PELLETIER - 01.55.35.56.01
Rédacteurs en chef Mathieu NOWAK (mensuel) - 01.55.35.56.38
Philippe PAJOT (La Recherche) - 01.70.98.19.29
Vincent REA (hors-série) - 01.55.35.56.35
avec Florence LEROY - 01. 55.35.56.36
Olivier LASCAR (digital) - 01.55.35.56.15
Adjoint à la rédaction en chef
Laurent PERICONE (édition) - 01.55.35.56.10
Rédacteur(trice)s en chef adjoint(e)s
Vincent GLAVIEUX (La Recherche) - 01.70.98.19.32
Andreina DE BEI (photo) - 01.55.35.56.31
Lise LOUMÉ (digital) - 01.55.35.56.39
Directeur(trice)s artistiques
Dominique PASQUET (couverture) - 01.55.35.56.59
Jean-Louis GILABERT - 01.55.35.56.28
Thalia STANLEY (adjointe) - 01.55.35.56.21
Secrétaire générale de la rédaction
Véronique MESSAGER - 01.55.35.56.18
Conseillère auprès de la direction de la rédaction
Rachel MULOT (cheffe de services enquêtes) - 01.55.35.56.07
Chef de service adjoint Hervé RATEL (actualités) - 01.55.35.56.45
Chef(fe)s de rubrique
Mathias GERMAIN (biologie, médecine, santé) - 01.70.98.19.33
Sylvie RIOU-MILLIOT (médecine, santé) - 01.55.35.56.54
Hugo JALINIÈRE (actualités, médecine) - 01.55.35.56.52
Rédaction Bernadette ARNAUD grande reporteure (archéologie, histoire) - 01.55.35.56.44
Franck DANINOS (fondamental) - 01.55.35.56.78
Arnaud DEVILLARD (numérique, data) - 01.55.35.56.27
Sylvie ROUAT (espace, océanologie) - 01.55.35.56.40
Collaborateurs(trices) Sylvie BOISTARD, Loïc CHAUVEAU, Johan KIEKEN, Fabrice NICOT
Chroniqueurs Christophe CASSOU, Jean-Gabriel GANASCIA, Céline GUIVARCH, Claire MATHIEU
Ont participé à ce numéro Pierre BERLOQUIN, Samantha DIZIER,Nicolas GUTIERREZ C., Pierre KALDY, Léa FOURNASSON, Margot MASSON,
Secrétaire de rédaction
Frank MIETTON (1er secrétaire) - 01.55.35.56.17
Maquette Horia BAHRI - 01.55.35.56.19
Photo-iconographie Isabelle TIRANT - 01.55.35.56.32
Claire BALLADUR - 01.70.98.19.41
Pôle digital Marine BENOIT (fondamental, archéologie) - 01.55.35.56.23 - Valentin COLLIAT-DANGUS (community manager) - 01.55.35.56.70 - Camille GAUBERT (santé) - 01.55.35.56.24 - Joël IGNASSE (espace, paléontologie) - 01.55.35.56.15 - Coralie LEMKE (santé) - 01.55.35.56.56
Anne-Sophie TASSART (cheffe de rubrique) - 01.55.35.56.41
Clémence BAUDOIN - responsable projets digitaux
Jessica RIOS - cheffe de projet digital
Documentation Isabelle DO O'GOMES (cheffe de service) - 01.55.35.56.49 - Astrid SAINT AUGUSTE - 01.55.35.56.48
Courrier des lecteurs
Sara DE LACERDA - courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr
Informatique Daniel DE LA REBERDIÈRE - 01.55.35.56.06
Directeur général Philippe MENAT
Responsable administrative et financière Jaye REIG - jreig@challenges.fr
Comptabilité - compta@challenges.fr
Responsable ressources humaines Sandrine MARTIN - smartin@challenges.fr
Fabrication Christophe PERRUSSON
Publicité MediaObs. 44, rue Notre-Dame-des-Victoires 75002 Paris Tél. : 01.44.88.97.70. Fax : 01.44.88.97.79.
Courriel : l'initiale du prénom puis nom suivi de @mediaobs.com
Directrice générale Corinne ROUGÉ - 01.44.88.93.70 - assistée de Marie-Noëlle MAGGI - 01.44.88.93.70
Directeur délégué Philippe LÉONARD - 01.44.88.89.18
Directeur de publicité Sylvain MORTREUIL - 01.44.88.97.75
Exécution : Cédric AUBRY - 01.44.88.89.05
Administration des ventes Catherine FERNANDES - 01.44.88.89.20
Directeur commercial Valéry SOURIEAU
Directeur des abonnements Luc BONARDI
Responsable des abonnements Lina QUACH - 01.55.35.56.63
Sciences et Avenir SAS
Président, Directeur de la publication : Claude PERDRIEL
Secrétaire général Jean-Claude ROSSIGNOL
Multimédia Sciences et Avenir, 41 bis, avenue Bosquet, 75007 Paris. - Tél. : 01 55 35 56 00

Origine du papier : Italie - Taux de fibres recyclées : 0 %
Eutrophisation : PTot = 0,017 kg/tonne de papier
Ce magazine est imprimé chez Roto France (Lognes), certifié PEFC

Certifié PEFC
Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées.
PEFC
10-31-1557
pefc-france.org

ACPM DIFFUSION

Les noms et adresses de nos abonnés seront communiqués aux organismes liés contractuellement avec *Sciences et Avenir*, sauf opposition. Dans ce cas, la communication sera limitée au service de l'abonnement. Ce numéro comporte un encart « Jeux de Maxi » et un message « Challenges » jetés sur couverture sur une partie de la diffusion abonnés ; ainsi qu'un encart « Sophia Boutique-Casque » jeté sur couverture sur la totalité de la diffusion abonnés. Commission paritaire n° 0625 K 79712. ISSN 00368636.Distribué par MLP.

HURTIGRUTEN EXPEDITIONS

Découvrez nos Croisières d'Expédition
sur **hurtigruten.fr**

EXPLOREZ L'ANTARCTIQUE

Économisez jusqu'à 500€ en réservant avant le 30.11

Bien plus qu'un simple voyageur, vous serez un explorateur, partant à la découverte de l'ultime continent vierge, de ses paysages immaculés, de ses icebergs et de ses colonies de manchots.

Croisières en Antarctique

Embarquez pour une aventure, sans égale, à bord de nos nouveaux navires d'expédition, qui offrent un confort scandinave moderne et une technologie hybride qui permet de laisser l'empreinte la plus faible possible.

Jusqu'à -500€ par personne
En réservant votre voyage en Antarctique, d'octobre 2022 à mars 2023, avant le 30.11.2021.

Réservez au 01 86 26 04 19

Offre soumise à conditions, non rétroactive et non cumulable, valable sur le tarif du jour pour toute nouvelle réservation avant le 30 novembre 2021, d'une croisière d'expédition en Antarctique, pour un départ entre octobre 2022 et mars 2023. La réduction varie selon l'itinéraire et la date de départ. HURTIGRUTEN SAS au capital de 40.000 € - RCS PARIS B 449 035 005 - IM075100037 – APST RCAPST HISGOX/125 520

photo: Dan Avila

SOMMAIRE

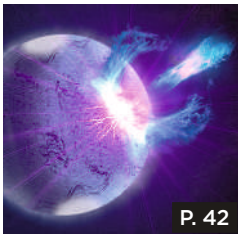
Sciences et Avenir - La Recherche / N° 896 / Octobre 2021

DOSSIER P. 28

Langage, mémoire, attention...

Les super-pouvoirs du cerveau

Décupler ses capacités intellectuelles ? C'est possible et à tout âge ! Notre dossier ouvre les pistes qui permettent de mieux comprendre le fonctionnement du cerveau et livre les clés indispensables pour apprendre à retenir efficacement.



P. 42

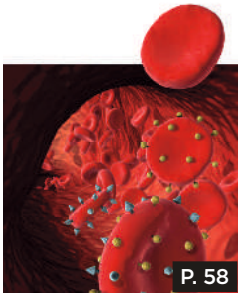
L'étoile à neutrons, astre de tous les extrêmes

De quoi est fait le cœur de ces étoiles hors norme ? D'un empilement de neutrons et protons ou d'un nouvel état de la matière ? Les physiciens tentent de les modéliser.

P. 52

Réchauffement climatique : le joker méthane

Des outils satellitaires de détection des fuites de ce gaz à effet de serre permettraient de réduire ses émissions et d'éviter une hausse de 0,3°C des températures mondiales.



P. 58

Ce que révèlent nos groupes sanguins

Que cachent ces lettres, A, B et O, les groupes sanguins les plus connus ? Les étudier permet de sécuriser les transfusions et d'améliorer le traitement des maladies du sang.

3 **Éditorial** par Dominique Leglu

4 **Courrier**

5 **Édito** par Mathieu Nowak

SCIENCES FONDAMENTALES

8 **ACTUALITÉS** La Voie lactée aurait un bras « cassé » / Retourner sur la Lune en 2024 est mission impossible / Un robot imite parfaitement le caméléon

42 **L'étoile à neutrons, astre de tous les extrêmes**

48 **L'armée des robots soldats en marche**

NATURE

14 **ACTUALITÉS** La fécondité des arbres diminue rapidement / Découverte de l'île la plus au nord de la planète / L'intelligence des abeilles dépend de la taille de leur cerveau

52 **Réchauffement : le joker méthane**

56 **La Loire se libère de son corset d'épis**

SANTÉ

18 **ACTUALITÉS** Les enfants en bas âge sont des gouffres énergétiques / Un patch pour détecter l'AVC / Une nouvelle piste thérapeutique pour l'endométriose

58 **Ce que révèlent nos groupes sanguins**

64 **Personnaliser le dépistage du cancer du sein**

68 **Dossier spécial : cinq questions pour bien se préparer à l'hiver**

72 **Nutrition : Les saveurs des huiles**

HISTOIRE

24 **ACTUALITÉS** La guerrière du Moyen Âge était un guerrier intersexe / Van Eyck, maître des points de fuite / Un nouveau record de taux d'ADN dénisovien aux Philippines

74 **Dans l'intimité du tyrannosaure**

82 **Comment « Salammbô » a influencé les archéologues**

TRANSVERSALES

86 **Entretien avec Bruno David,** président du Muséum national d'histoire naturelle de Paris

90 **Chroniques** Climat par Christophe Cassou / Mathématiques par Claire Mathieu / Éthique par Jean-Gabriel Ganascia / L'œil d'Olivier Lascar

92 **Sélection livres**

94 **Expositions**

95 **Le ciel d'octobre**

96 **Questions de lecteurs**

97 **Jeux**

JOHN M LUND PHOTOGRAPHY INC/ GETTY IMAGES - NASA'S GODDARD SPACE FLIGHT CENTER/S. WIESSINGER - DICIER FLORENTZ POUR SCIENCES ET AVENIR/LA RECHERCHE - BRUNO BOURGEOIS - SPL/ SUCRÉ DALÉ

Galaxie en spirale, la Voie lactée est composée de quatre bras principaux, et peut-être d'un cinquième selon de récentes observations effectuées par des astronomes chinois.

SCIENCE PHOTO LIBRARY / MARK GARLICK

La Voie lactée aurait un bras « cassé »

Des observations menées avec des télescopes spatiaux révèlent une anomalie dans l'un des bras de notre galaxie.

Le bras du Sagittaire, l'un des bras en spirale qui composent notre galaxie serait… cassé. En utilisant les télescopes spatiaux Gaia et Spitzer, une équipe internationale d'astronomes a en effet mis en évidence une rupture de continuité, à la manière d'une fracture osseuse. Dans cette zone qui s'étend sur 3000 années-lumière, les étoiles se déplacent toutes à la même vitesse et dans la même direction. Mais alors que le bras du Sagittaire s'écarte du centre galactique selon un angle de 12°, la région en question dessine un angle de près de 60°. C'est la première fois qu'on observe une telle discontinuité dans un des bras de la Voie lactée. *« Perturbations gravitationnelles, forces de cisaillement dues à la rotation de la galaxie sur elle-même… L'origine de cette cassure est encore incertaine,* commente Paola Di Matteo, astronome à l'observatoire de Paris. *Mais c'est une nouvelle pièce du puzzle qui pourrait nous dire quelque chose d'important sur notre galaxie dans son ensemble.* »

L'origine de cette discontinuité, qui évoque une fracture osseuse, est encore incertaine

Mais ce n'est pas la seule surprise que nous réservait la Voie lactée. Des astronomes de l'université de Nankin (Chine) ont parallèlement mis en évidence une nouvelle structure qui pourrait être un cinquième bras spiral passé jusqu'ici inaperçu. Grâce au radiotélescope FAST, les scientifiques ont débusqué un filament de poussières et de gaz aux dimensions colossales de 16 000 années-lumière de long pour 675 années-lumière de large… à plus de 70 000 années-lumière du centre galactique. Baptisé « queue de chat » en raison de sa forme très élancée, ce filament serait le plus grand et le plus éloigné jamais observé. La manière dont un tel appendice aurait pu se former reste inconnue. De quoi bousculer les représentations actuelles de la Voie lactée, disque mesurant au minimum 120 000 années-lumière de diamètre et abritant plus de 100 milliards d'étoiles. En son cœur, une large bande centrale entourée d'un bulbe se prolonge en bras en spirale — gigantesques structures où la densité d'étoiles, de poussières et de gaz est beaucoup plus importante qu'ailleurs. *« L'architecture précise de la Voie lactée est très difficile à caractériser car nous y sommes immergés, à mi-chemin entre le centre du disque galactique et sa bordure externe,* explique Paola Di Matteo. *C'est comme si on cherchait à reconstituer la physionomie d'une forêt en l'observant uniquement depuis l'intérieur.* » ■ **F. D.**

Retourner sur la Lune en 2024 est mission impossible

L'objectif fixé par l'ancien président américain Donald Trump ne pourra pas être tenu à cause de problèmes matériels.

NASA/JPL-CALTECH

La nouvelle génération de scaphandres ne sera pas prête avant 2025.

Le Bureau de l'inspecteur général (OIG) de l'agence spatiale américaine a donc rendu son verdict : *« Un atterrissage sur la Lune fin 2024 tel que la Nasa le prévoit n'est pas réalisable. »* Claironné il y a deux ans par l'administration de l'ancien président Donald Trump, le retour des astronautes américains sur la Lune se trouve ainsi repoussé. En cause, des retards concernant le lanceur géant SLS, le vaisseau spatial Orion et le module d'atterrissage HLS. Mais l'audit de l'OIG dévoile et détaille un nouveau problème : les combinaisons spatiales ne seront jamais prêtes à temps !

Dénommée xEMU (Exploration Extravehicular Mobility Unit), cette nouvelle génération de scaphandres doit faciliter les déplacements des astronautes, convenir à toutes les morphologies et les protéger plus efficacement des poussières lunaires très abrasives. Développés depuis 2007 par une vingtaine de partenaires, ils devraient coûter *« plus d'un milliard de dollars »* à la Nasa, estime le rapport de l'OIG, mais ne seront *« pas prêts à voler avant avril 2025 »*. **F. D.**

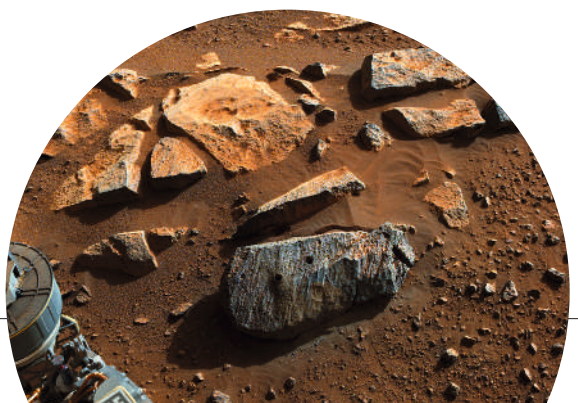
EN DEUX MOTS

VOL. SpaceShipTwo de Virgin Galactic est cloué au sol par l'Autorité américaine de l'aviation civile pour des dysfonctionnements constatés lors du vol du 11 juillet dernier. **ÉNERGIE.** Des ingénieurs suisses ont mis au point un nanogénérateur triboélectrique, sorte de parquet qui utilise l'énergie fournie lorsqu'on marche dessus pour éclairer une ampoule. **COSMIQUE.** Des scientifiques américains du California Institute of Technology ont détecté pour la première fois une supernova provoquée par la fusion entre deux étoiles.

EN IMAGE

Perseverance collecte ses premiers échantillons martiens

EXPLORATION Après son échec du mois d'août, le rover de la Nasa Perseverance a recueilli ses deux premiers échantillons martiens sur une pierre baptisée « Rochette » *(percée de deux trous sur la photo ci-dessous)*. Placés dans des tubes de 6 cm de long, ils contiennent des sels minéraux probablement formés après un processus d'évaporation de l'eau. Une trentaine d'échantillons devraient être collectés en tout, avant d'être rapatriés sur Terre vers 2030. **F. D.**



VUE EN HAUTE RÉSOLUTION PRISE AVEC L'OFAR DE HERCULE A.

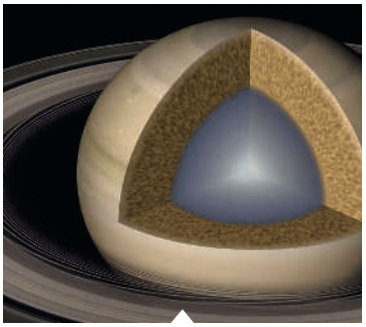
506 200 Le nombre de nouveaux astéroïdes

ASTRONOMIE La moisson a dépassé toutes les espérances : en analysant des images prises entre 1998 et 2009 par l'observatoire Apache Point (États-Unis) Alexey Sergeyev et Benoit Carry, de l'université Côte d'Azur, à Nice, ont découvert plus d'un demi-million d'astéroïdes. Leur travail aura duré un an. **H. J.**

Saturne a le cœur gros

PLANÉTOLOGIE Des astronomes américains ont analysé les ondulations qui se propagent le long des anneaux de Saturne et utilisé ces derniers comme un « sismomètre » pour étudier les entrailles de la géante gazeuse. Son noyau serait ainsi beaucoup plus gros qu'escompté, occupant 60 % du rayon total (58 232 km) de la planète. Il serait également pâteux et sans réelles frontières. **F. D.**

SOURCE : C. MALKOVICH, INSTITUT DE TECHNOLOGIE DE CALIFORNIE, ÉTATS-UNIS.



CALTECH/R. HURT (IPAC)

Le noyeau de Saturne serait plus gros qu'escompté, selon les derniers relevés.

ANDRE GROSSMAN

QUESTIONS À

André Grosman

Directeur adjoint de l'Institut de recherche pour la fusion par confinement magnétique (IRFM, CEA)

Un nouveau record de fusion nucléaire

Le National Ignition Facility en Californie (États-Unis) a réalisé une avancée majeure pour la recherche en fusion nucléaire, en produisant huit fois plus d'énergie que lors du record précédent.

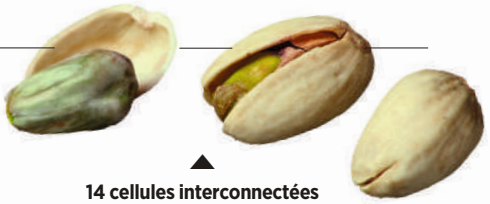
Que signifie ce nouveau record ?
C'est une réussite remarquable car elle s'approche du seuil d'ignition : lorsque la puissance produite par la réaction nucléaire dépasse l'énergie apportée par les lasers qui enclenchent la fusion. L'équipe a réussi à produire l'équivalent de 70 % de l'énergie fournie par les lasers.

Quelle est la différence avec la collaboration internationale Iter ?
Le National Ignition Facility fait de la fusion par confinement inertiel, qui consiste à envoyer de nombreux faisceaux laser sur une cible, afin de la comprimer pour que la fusion s'enclenche. Avec Iter — comme à l'IRFM où je travaille —, nous développons le confinement magnétique : la matière en fusion, sous forme de plasma (gaz ionisé), est maintenue en équilibre grâce à de puissants champs magnétiques.

Sommes-nous proches de produire de l'électricité grâce à la fusion ?
Pour la fusion inertielle, c'est difficile car cela nécessite une fréquence des impulsions laser très élevée. Mais en fusion magnétique, deux types de réacteurs sont en bonne voie : les tokamaks, comme dans Iter, et les stellarators. Ces derniers sont plus stables, mais plus difficiles à construire. D'ici à une dizaine d'années, nous en saurons plus sur le dispositif à privilégier.

Propos recueillis par L. F.

La résistance des pistaches élucidée


FERUMOV/SHUTTERSTOCK

14 cellules interconnectées confèrent à la coquille sa solidité exceptionnelle.

MATÉRIAUX De tous les fruits à coque, c'est la pistache qui possède la coquille la plus dure. Son secret ? Des cellules emboîtées et interconnectées au niveau tridimensionnel. Chacune est en effet liée à 14 autres cellules par des structures moléculaires en « joints à rotule », comparables à l'articulation de la hanche humaine. De quoi inspirer de nouveaux types de pare-chocs ou de casques de sécurité, selon les biophysiciens. **F. D.**

SOURCE : NANNAN XIAO, INSTITUT DE BIOPHYSIQUE DE VIENNE, AUTRICHE.

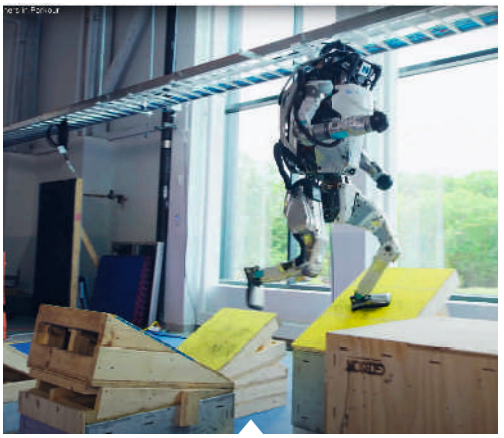
20 secondes Le temps minimal de lavage des mains

PHYSIQUE En modélisant les rugosités à la surface de la peau, semblables à une suite de bosses et de creux, des physiciens britanniques ont calculé la force et donc le temps nécessaire pour déloger les micro-organismes (virus et bactéries) piégés dans les anfractuosités. Il s'agit cependant d'une durée moyenne, dépendante du flux d'eau… et de la vigueur avec laquelle les mains sont frottées. **F. D.**

SOURCE : HAMMOND CONSULTING LIMITED, CAMBRIDGE, ROYAUME-UNI.

EN IMAGE

Atlas, l'humanoïde champion de « parkour »


BOSTON DYNAMICS

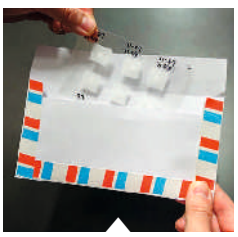
Dans une vidéo nouvellement diffusée, Atlas, le robot de Boston Dynamics exécute un salto arrière.

ROBOTIQUE Courir, sauter, danser… Les robots de Boston Dynamics ont offert une nouvelle démonstration de leur agilité en s'essayant cette fois au « parkour », technique de déplacement acrobatique sur un circuit mettant à l'épreuve le sens de l'équilibre. La vidéo diffusée par la société américaine montre une coordination étonnante entre les membres supérieurs et inférieurs, jusqu'à réussir des saltos arrière. **O. L.**
sciav.fr/896robot

Spermatozoïdes lyophilisés pour l'ISS

ESPACE Pour la première fois, des chercheurs ont lyophilisé des spermatozoïdes de souris pour faciliter leur transport vers la Station spatiale internationale. Au lieu des fioles cassantes et encombrantes, ils peuvent désormais se contenter de simples enveloppes, sortes d'herbiers de spermatozoïdes, pour faire les envois à l'ISS. **A.-S. T.**

SOURCE : DAIYU ITO, UNIVERSITÉ DE YAMANASHI, JAPON.


DAIYU ITO, UNIVERSITY OF YAMANASHI.

De simples enveloppes permettent le transport des spermatozoïdes.

La Poste – SA au capital de 5 364 851 364 € – 356 000 000 RCS Paris – Siège social : 9, rue du Colonel Pierre Avia 75015 Paris – © Getty images – BETC - HAVAS PARIS

La Poste s'engage avec WWF France vers une livraison 0 carbone.

La Poste est pionnière depuis plus de 10 ans dans la neutralité carbone grâce à la réduction et à la compensation volontaire de 100 % des émissions restantes. Elle poursuit aujourd'hui son engagement pour tendre vers la livraison zéro carbone.

WWF | ECOLOGIC

La Poste et WWF France, ensemble vers une livraison zéro carbone.

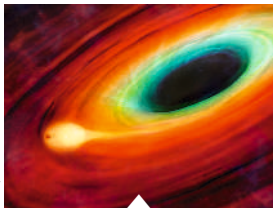
LA POSTE

EcolOgic est un marquage qui identifie la démarche de réduction des émissions de CO_2 et de compensation carbone par Le Groupe La Poste. Retrouvez tous nos engagements sur laposte.fr/neutralitecarbone

Le télescope James-Webb paré au décollage

ASTRONOMIE Avec près de 15 ans de retard sur le calendrier initial, tous les voyants sont au vert pour le télescope spatial James-Webb. Conçu par les agences américaine, européenne et canadienne, il devrait s'envoler le 18 décembre de Kourou (Guyane) à bord d'une fusée Ariane 5. *Sciences et Avenir* vous donne rendez-vous le mois prochain pour découvrir tous les secrets de ce télescope hors norme qui sera capable d'observer des galaxies en formation et peut-être même les premières étoiles. **F. D.**

Une nouvelle technique pour mesurer la masse des trous noirs

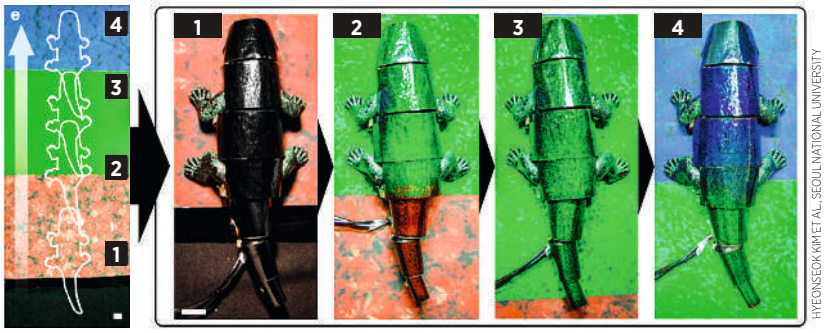


MGA / SCIENCE PHOTO LIBRARY VIA AFP

Un trou noir déforme une étoile avant qu'elle ne disparaisse.

ASTROPHYSIQUE La masse des trous noirs est liée à la lumière qu'ils émettent et au scintillement émis par leur disque d'accrétion. C'est ce qu'ont découvert des scientifiques en ciblant 67 trous noirs supermassifs, situés au centre de grandes galaxies. Leurs recherches pourraient mener à une nouvelle méthode de caractérisation de ces mystérieux objets astrophysiques. **L. F.**

SOURCE : COLIN BURKE, UNIVERSITÉ DE L'ILLINOIS, ÉTATS-UNIS.



HYEONSEOK KIM ET AL., SEOUL NATIONAL UNIVERSITY

Des capteurs situés sous le corps de la machine permettent le changement de couleur en temps réel.

Un robot imite parfaitement le caméléon

Sa peau recouverte de cristaux liquides change de couleur en fonction des endroits où il se déplace.

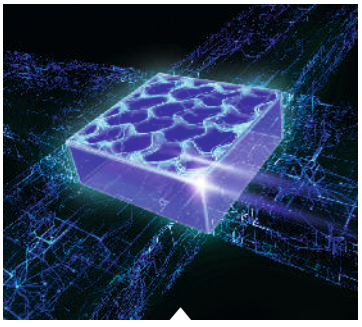
BIOMIMÉTISME Ce robot a non seulement l'allure du caméléon mais il en a la propriété principale : la couleur de sa peau synthétique se modifie avec celle de son environnement. Publié dans *Nature*, ce projet est mené par une équipe de la faculté de génie mécanique de l'université nationale de Séoul (Corée du Sud). La vraie performance est d'opérer le changement de couleur en temps réel : lorsque le sol orange devient vert, le corps du robot se divise en deux couleurs, la nouvelle teinte progressant à mesure que le caméléon avance.

Pour réaliser cet exploit, des capteurs, situés sous le corps de la machine, jaugent l'intensité lumineuse. L'information est transmise à des nanofils d'argent générateurs de chaleur insérés dans un film polymère incolore. En chauffant, ils vont faire générer à des cristaux liquides différentes couleurs. Au milieu des herbes, l'engin peut même se couvrir de motifs de type camouflage. **A. D.**

Solide et liquide, c'est le premier « supersolide »

CHIMIE Pour la première fois, des scientifiques ont créé un supersolide en deux dimensions. Un état quantique de la matière atteint lorsque la température se rapproche du zéro absolu (-273,15 °C). Les atomes qui composent le supersolide sont maintenus dans un arrangement cristallin — caractéristique des solides — mais des particules étrangères peuvent passer au travers, sans rencontrer de résistance, de la même manière que s'il s'agissait d'un superfluide. **L. F.**

SOURCE : MATTHEW NORCIA, INSTITUT D'INFORMATION QUANTIQUE DE VIENNE, AUTRICHE.



IQOQI INNSBRUCK/HARALD RITSCH

Des particules étrangères peuvent passer au travers de ce « supersolide », sans rencontrer de résistance.

381 600 km/h

La vitesse de l'astéroïde le plus rapide du Système solaire

ASTRONOMIE Découvert cet été, l'astéroïde 2021PH27 d'un kilomètre de diamètre est le plus rapide du Système solaire. Il boucle son orbite autour du Soleil en seulement 113 jours, la plus courte période de révolution pour un astéroïde. Mais la seconde pour un corps autour du Soleil puisque Mercure fait sa révolution en 88 jours seulement. **H. J.**

SOURCE : SCOTT SHEPPARD, CARNEGIE INSTITUTION FOR SCIENCE, ÉTATS-UNIS.

MON ASSURANCE DÉCÈS

ANTICIPER, POUR QUE MÊME SANS VOUS

VOTRE FAMILLE CONTINUE D'AVANCER.

Définissez avec votre conseiller un capital destiné à vos enfants en cas de décès, qui peut leur être versé en une fois ou mensuellement pour leurs études par exemple.

AGIR CHAQUE JOUR DANS VOTRE INTÉRÊT ET CELUI DE LA SOCIÉTÉ

Document à caractère publicitaire.
Mon Assurance Décès est un contrat d'assurance temporaire décès de groupe assuré par PREDICA, filiale d'assurance de personnes de Crédit Agricole Assurances. PREDICA S.A. au capital de 1029934935 € entièrement libéré, entreprise régie par le Code des Assurances – 334028123 RCS Paris. Siège social : 16-18 boulevard de Vaugirard - 75015 Paris. Les dispositions complètes du contrat, les limites et les modalités de mise en œuvre des garanties figurent dans la notice d'information.
Ce contrat est distribué par votre Caisse régionale de Crédit Agricole, immatriculée auprès de l'ORIAS en qualité de courtier d'assurance. Les mentions de courtier en assurances de votre Caisse sont disponibles sur mentionscourtiers.credit-agricole.fr ou dans votre agence Crédit Agricole. Sous réserve de la disponibilité de cette offre dans votre Caisse régionale.
08/2021 – Édité par Crédit Agricole S.A., agréé en tant qu'établissement de crédit – Siège social : 12, place des États-Unis, 92127 Montrouge Cedex – Capital social : 9276058473 € – 784608416 RCS Nanterre.
Crédit photo : Getty Images. BETC

JEAN-PHILIPPE DELOBELLE/BIOSPHOTO

La sénescence des arbres pourrait s'expliquer par leur hauteur et non par une continuelle production de graines.

La fécondité des arbres diminue rapidement

Une étude sur près de 600 espèces remet en cause l'idée que la fertilité des arbres ne faiblit jamais voire augmente avec le temps.

Les arbres aussi perdent de la vigueur sexuelle avec l'âge ! C'est la découverte très inattendue d'écologues de l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (Inrae) et de l'université Duke (États-Unis) que vient de publier la revue *PNAS*. Le chercheur américain James Clark a réuni les observations faites sur 585 670 arbres appartenant à 597 espèces en provenance de plus de 60 laboratoires dans le monde. La baisse de fertilité est certaine pour 80 % des espèces. *« Les 20 % restants n'ont pas pu être évalués du fait du manque de données sur une durée suffisamment importante,* précise Sylvain Delzon, chercheur à l'Inrae qui a participé à l'étude. *C'est le cas du chêne pour lequel l'on manque d'observations anciennes. »* Les scientifiques savaient déjà que la croissance des pins maritimes diminuait à partir de 25 ans d'âge et les chênes verts après 60 ans, mais ils ignoraient que la fécondité chutait également. Au contraire ! les gestionnaires forestiers estimaient jusqu'à présent que la fécondité augmentait même avec l'âge grâce à des branches et des feuilles toujours plus nombreuses.

Une hypothèse définitivement écartée

Ce résultat aide aussi à répondre à une question cruciale : pourquoi les arbres meurent ? *« On pourrait penser qu'un être vivant qui renouvelle ses organes tous les ans se rajeunit indéfiniment et évite la sénescence et la mort. Or ce n'est pas le cas »*, poursuit Sylvain Delzon. Une hypothèse veut que les arbres s'épuisent à produire toujours plus de graines, au détriment de leur croissance. Les pertes en carbone importantes qui en découlent provoqueraient ainsi la sénescence. Mais l'article des *PNAS* enterre définitivement cette spéculation. Reste une autre explication, celle dite de la limitation hydraulique. *« Les arbres finissent par atteindre une hauteur telle que l'effort de circulation de la sève dans toute la canopée devient trop important, provoquant l'assèchement et la mort des branches sommitales »*, décrit Sylvain Delzon qui étudie cette hypothèse depuis des années. ■ **L. C.**

LE MOT DU MOIS

Kleptotrichie

ÉTHOLOGIE Certains petits oiseaux prennent des risques inconsidérés pour ramasser quelques poils afin de garnir leur nid. Ils se servent sur le dos de chats, chiens, renards, ratons laveurs et parfois jusque sur la tête d'humains. Ce comportement fait pour la première fois l'objet d'une publication. L'occasion de lui donner enfin un nom : la kleptotrichie, du grec *klepto* (voler) et *trikhos* (cheveu, poil). **H. J.**

SOURCE : HENRY POLLOCK, UNIVERSITÉ DE L'ILLINOIS, ÉTATS-UNIS.

Le plumage anti-harcèlement des colibris femelles

JAY J. FALK ET AL./ILL. JILLIAN DITNER

Certaines femelles « Florisuga mellivora » arborent un plumage plus coloré (à gauche) que celui des mâles (à droite).

ORNITHOLOGIE Environ 20 % des femelles colibris jacobins arborent des plumages très colorés inhabituels pour l'espèce. Une étude menée sur 436 individus montre que cette particularité leur donne un avantage social. Moins sollicitées par les mâles, qui préfèrent les femelles au plumage terne, elles passent plus de temps à se nourrir. **T. T.**

SOURCE : JAY FALK, LABORATOIRE CORNELL D'ORNITHOLOGIE, ÉTATS-UNIS.

RIVAGES
DU MONDE

Prendre le large, c'est essentiel.

RCS Paris B 438 679 664 – 150 000 euros - Atout France IM 075 100 099 – Crédit Dreamstime

Croisières

EXPÉDITIONS

NORVÈGE • ARCTIQUE • ISLANDE • GROENLAND • SPITZBERG

A bord d'un véritable yacht d'expédition, conçu pour 180 passagers.
Un navire à propulsion hybride, pouvant stationner sans jeter l'ancre, pour une meilleure protection des sanctuaires marins. Des conférenciers spécialistes des régions polaires présents à bord.

SA01

Voguer. Échanger. Rêver

RÉSERVEZ VOTRE CROISIÈRE AU 01 83 96 85 03 OU SUR WWW.RIVAGESDUMONDE.FR

Découverte de l'île la plus au nord de la planète

Cet îlot de 60 mètres de long a été exploré par hasard lors d'une expédition scientifique. Les conditions exactes de son apparition demeurent mystérieuses.

Lorsqu'ils ont posé le pied sur cet îlot de boues et de moraines, les chercheurs danois de l'université de Copenhague (Danemark) pensaient arpenter Oodaaq, une île au nord du Groenland jusque-là considérée comme la plus septentrionale du monde. Mais c'était compter sans les réseaux sociaux : à la publication de photos et des coordonnées de l'île par le géologue Morten Rasch, chef de la mission, des « chasseurs d'îles » américains ont rapidement noté une anomalie.

JULIAN CHARRIÈRE/ LESTER EXPEDITION AROUND NORTH GREENLAND 2021

Constituée de boues et de moraines, l'île s'élève à 4 mètres au-dessus du niveau de la mer.

Des mesures GPS complémentaires ont confirmé que l'expédition avait en fait débarqué sur une terre inconnue située à 780 m au nord d'Oodaaq. L'îlot de 60 m de long pour 30 m de large pourrait avoir émergé à la suite d'une puissante tempête qui aurait raclé les fonds marins et accumulé ce banc rocheux s'élevant à moins de 4 m au-dessus du niveau de la mer. Les mouvements marins et les tempêtes pourraient d'ailleurs ne lui valoir qu'une existence éphémère. **S. R.**

ANNA ZORA ET AL., FRÉGATE ISLAND FOUNDATION, FRÉGATE, SEYCHELLES

À VOIR SUR LE NET

L'attaque de la tortue géante

HERPÉTOLOGIE. Le reptile ne s'est pas arrêté avant d'avoir avalé sa proie. Sur l'île de Frégate, une tortue géante des Seychelles a été filmée alors qu'elle poursuivait — lentement — un oisillon sterne tombé du nid. Une scène inédite pour un animal réputé herbivore exclusif. **A.-S. T.** sciav.fr/896Tortue

SOURCE : JUSTIN GERLACH, PETERHOUSE CAMBRIDGE, ROYAUME-UNI.

24 400 milliards

Le nombre de microplastiques à la surface des océans

POLLUTION C'est l'évaluation la plus précise à ce jour du nombre de fragments de plastique de moins de 5 millimètres polluant la surface des océans. Réalisée à partir de 8218 prélèvements dans le monde, l'étude estime la masse totale de ces microplastiques comprise entre 82 000 et 578 000 tonnes. **L. C.**

SOURCE : ATSUHIKO ISOBE, UNIVERSITÉ IMPÉRIALE DE KYUSHU, JAPON.

L'intelligence des abeilles dépend de la taille de leur cerveau

APIDOLOGIE Chez les abeilles, plus le cerveau est gros, meilleures sont les performances cognitives. C'est ce que montre une étude qui a mesuré la rapidité de 120 spécimens de 16 espèces à comprendre et répéter un test, avant de peser leur cerveau sur une microbalance. Mention spéciale pour les abeilles des sables dont le cerveau est plus gros que celui des abeilles domestiques. **L. C.**

SOURCE : MIGUEL COLLADO, STATION BIOLOGIQUE DONANA, ESPAGNE.

MICHEL RAUCH/BIOSPHOTO

Suivant les espèces, l'abeille est dotée d'un cerveau plus ou moins gros.

Une arme olfactive anti-pucerons

ENTOMOLOGIE Des chimistes ont mis au point un cocktail pour faire fuir les pucerons. Pour cela, ils ont extrait les composés volatiles responsables de l'odeur des coccinelles, leur prédateur le plus impitoyable, et les ont présentés aux antennes des insectes parasites. Un « électro-antennogramme » leur a permis de déterminer les molécules les plus repoussantes. **R. M.**

SOURCE : SARA HERMANN, UNIVERSITÉ D'ÉTAT DE PENNSYLVANIE, ÉTATS-UNIS.

POUR MARION, ENSEIGNANTE, RÉUSSIR SA RENTRÉE N'EST PAS UN PROBLÈME.

Banque Populaire et la **CASDEN**, la banque coopérative de la Fonction publique, accompagnent les enseignants pour une rentrée scolaire réussie, que ce soit pour leurs besoins personnels, avec des offres dédiées aux agents de la Fonction publique, ou pour leurs projets professionnels, avec la mise à disposition d'outils culturels et pédagogiques.

PARIS 2024

PARTENAIRE PREMIUM

casden BANQUE POPULAIRE

BANQUE POPULAIRE

la réussite est en vous

Document à caractère publicitaire et non contractuel.

BPCE - Société anonyme à directoire et conseil de surveillance au capital de 180 478 270 euros - Siège social : 50, avenue Pierre Mendès France - 75201 Paris Cedex 13 - RCS Paris N° 493 455 042 - CASDEN Banque Populaire - Société Anonyme Coopérative de Banque Populaire à capital variable - Siège social : 1 bis rue Jean Wiener 77420 Champs-sur-Marne - Siren n° 784 275 778 - RCS Meaux - Immatriculation ORIAS n° 07 027 138 - Crédit photo : Getty Images -

Les enfants en bas âge sont des gouffres énergétiques

Une étude a quantifié l'énergie utilisée par l'humain au cours de sa vie. Chez l'enfant, la croissance du cerveau nécessite une dépense calorique démesurée.

Les enfants de moins de 5 ans brûlent 50 % d'énergie en plus qu'un adulte de 20 ans rapporté à la masse corporelle. C'est ce que révèle la toute première étude à avoir analysé comment le corps utilise de l'énergie à différentes étapes de la vie. Publiés dans *Science*, ces travaux ont regroupé les résultats de toutes les publications existantes sur la consommation d'énergie par le corps humain, analysant un total de 6421 personnes de 29 pays, âgés de 8 jours à 95 ans. Grâce à ces données, les chercheurs ont calculé la vitesse à laquelle le corps consomme des calories, mettant en évidence une grande variabilité selon les âges concernés.

PLAINPICTURE / FRANK MUCKENHEIM SINON K.

Entre 9 mois et 5 ans, le corps de l'enfant connaît une croissance modérée, la majorité de son énergie étant absorbée par le cerveau en développement.

Des besoins énormes source de vulnérabilité

À la naissance, les nouveaunés ont un taux métabolique similaire à celui de leurs mères. Mais neuf mois après la naissance, cette utilisation d'énergie grimpe en flèche, atteignant un pic à 5 ans : ils utilisent alors 50 % d'énergie en plus que les jeunes adultes. Les auteurs suggèrent que cette très haute consommation d'énergie par les enfants en bas âge serait due à leur développement, notamment à la croissance de leur cerveau. En 2014, déjà, une étude avait montré que le cerveau des tout-petits consomme près de la moitié de toute l'énergie absorbée. Au point que le corps doit parfois cesser de croître. Ces besoins gigantesques seraient également responsables de la vulnérabilité des enfants en bas âge, qui peuvent tomber malades ou développer des problèmes de croissance s'ils ne consomment pas suffisamment de calories. Ce taux métabolique commence à diminuer à partir de 5 ans jusqu'à l'âge de 20 ans, pour rester à peu près stable jusqu'à 60 ans. Ensuite, une nouvelle chute se produit, au point qu'une personne de 90 ans n'utilise plus qu'un quart de l'énergie consommée par un adulte dans la cinquantaine. ■ **N. G. C.**

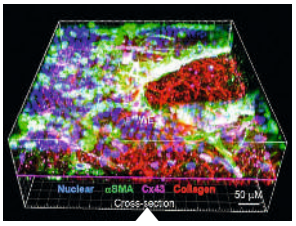
Les hallucinations sont aussi exacerbées par une consommation quotidienne du cannabis.

Le cannabis quotidien favorise le risque de schizophrénie

PSYCHIATRIE Le risque de faire un premier épisode psychotique est plus élevé chez les consommateurs réguliers de cannabis même sans prédispositions génétiques à la maladie, conclut une vaste étude européenne. Les symptômes les plus visibles tels que délires et hallucinations sont aussi exacerbés par la consommation quotidienne de la drogue. **P. K.**

SOURCE : DIEGO QUATTRONE, KING'S COLLEGE LONDON, ROYAUME-UNI.

BSIP



E. COSTA ET AL.

Prolifération cellulaire (en vert) et production de collagène (en rouge) cicatrisent la membrane.

Un fœtus s'autorépare

EMBRYOLOGIE Les membranes fœtales dont l'intégrité est vitale pour le développement ont la capacité de s'autorégénérer. Des chercheurs viennent de mettre en évidence *in vitro* le rôle de la protéine Cx43 pour attirer des cellules productrices de collagène, contracter les tissus et réparer la plaie. Une découverte prometteuse pour réduire le risque de rupture des membranes, cause majeure de naissance prématurée et responsable d'environ 40 % des décès du nourrisson. **H. J.**

SOURCE : ELENI COSTA, QUEEN MARY UNIVERSITY OF LONDON, ROYAUME-UNI.

MINISTÈRE
DE L'ENSEIGNEMENT
SUPÉRIEUR,
DE LA RECHERCHE
ET DE L'INNOVATION

Liberté
Égalité
Fraternité

fête de la Science 30 ans

eurêka !

émotion
de la découverte

France métropolitaine
1 > 11 oct.

Outre-mer & international
5 > 15 nov.

#FDS2021
fetedelascience.fr

Crédits : Conception MESRI / Delcomt
Photographie : Adobe Stock / Cookie Studio

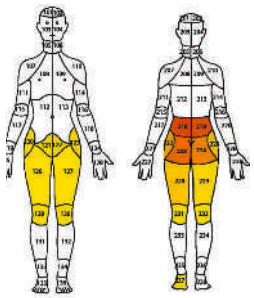
france•tv arte VINCI 107.7 THE CONVERSATION Explore media
SCIENCES AVENIR La Recherche Youpi J'AI COMPRIS ! images DOC astrapi OKAPI

La douleur cartographiée

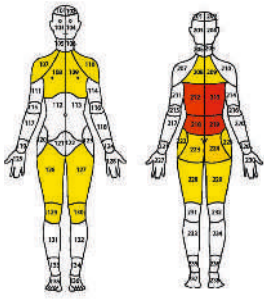
ALGOLOGIE Voici la première « mise en carte » corporelle de la douleur chronique. Elle a été obtenue à l'issue d'une étude sur plus de 21 500 patients, dans laquelle chacun était invité à pointer sur des silhouettes schématiques ses zones douloureuses. Un algorithme a ensuite établi neuf types d'associations des zones douloureuses en fonction du profil des patients. **S. R.-M.**

SOURCE : BENEDICT ALTER, UNIVERSITÉ DE PITTSBURGH, ÉTATS-UNIS.

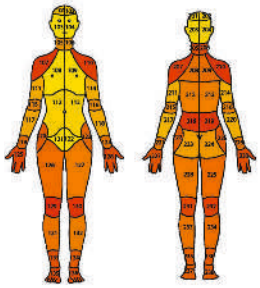
Trois des neuf « cartes corporelles » de douleurs chroniques associées des moins (jaune) aux plus intenses (rouge).



Douleurs lombaires irradiant vers les cuisses (de face et de dos).



Douleurs dorsales supérieures et inférieures.



Douleurs aigües généralisées.

B. J. ALTER ET AL.

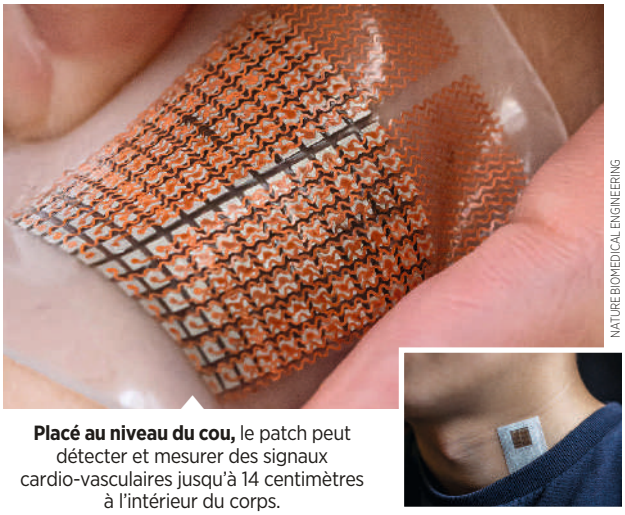
Un patch pour détecter l'AVC

Ce prototype à ultrasons analyse toute anomalie du flux sanguin qui irrigue le cerveau.

Porté au niveau du cou ou de la poitrine, ce patch analyse par ultrasons le flux sanguin circulant au niveau des vaisseaux. Son intérêt : détecter une anomalie de ce flux et prédire la survenue d'un accident vasculaire cérébral (AVC), comme d'autres dispositifs tentent de prédire une crise d'épilepsie (*lire* S. et A. *n° 870*).

Le prototype développé par des bioingénieurs de l'université de Californie à San Diego (États-Unis) présenté dans la revue *Nature Biomedical Engineering* surveille en continu et en temps réel le flux sanguin sur une zone étendue et jusqu'à 14 centimètres en profondeur du corps. Les capteurs d'ultrasons millimétriques ont de plus la particularité de s'incliner sous différents angles, ce qui permet d'analyser d'autres zones que celles situées directement sous le patch.

Reste à confirmer son potentiel car il n'a encore été testé que sur des volontaires sains. **S. R.-M.**



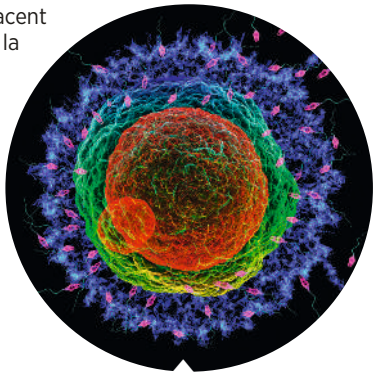
NATURE BIOMEDICAL ENGINEERING

Placé au niveau du cou, le patch peut détecter et mesurer des signaux cardio-vasculaires jusqu'à 14 centimètres à l'intérieur du corps.

« Rajeunir » les vieux ovules

FERTILITÉ La découverte d'un mécanisme lié à la baisse de fertilité des femmes après 35 ans pourrait permettre d'améliorer la qualité des ovules en intervenant sur le cycle cellulaire. Avec l'âge, certains chromosomes se déplacent plus lentement lors de la méiose, phase cruciale de la division cellulaire, contribuant à une répartition inégale des chromosomes. Prolonger cette phase en laboratoire permet à ces derniers de se distribuer correctement dans les cellules et améliorer la fertilité. **H. J.**

SOURCE : G. FITZHARRIS, UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL, CANADA.



En agissant sur le cycle cellulaire des ovules, leur qualité pourrait être améliorée (ici une fécondation).

PHANIE

Pourquoi l'asthme s'aggrave pendant la nuit

PNEUMOLOGIE Si l'asthme s'aggrave chez 75 % des patients la nuit, c'est en partie à cause du cycle circadien (jour/nuit) sur lequel notre organisme est naturellement calé, selon une étude qui met notamment en avant les modifications hormonales associées. Selon les observations, la pire heure se situerait aux alentours de 4 heure du matin, avec une probabilité multipliée par quatre de devoir recourir au bronchodilatateur. **C. G.**

SOURCE : FRANCK SCHEER, ÉCOLE DE MÉDECINE HARVARD, ÉTATS-UNIS.

FONDATION ARC
POUR LA RECHERCHE
SUR LE CANCER
Reconnue d'utilité publique

FACE AU CANCER
VOTRE ASSURANCE-VIE PEUT FAIRE LA DIFFÉRENCE

En désignant la Fondation ARC, **reconnue d'utilité publique et 100% dédiée à la recherche sur le cancer,** comme **bénéficiaire de votre assurance-vie,** vous lui permettez d'agir rapidement en soutenant des équipes de chercheurs d'excellence, passionnés et déterminés à trouver de nouvelles solutions thérapeutiques. Ainsi, votre générosité nous aidera **à accélérer la recherche et sauver plus de vies.**

DON en CONFIANCE comitecharte.org

DEMANDE D'INFORMATION GRATUITE ET CONFIDENTIELLE

À retourner sous enveloppe affranchie à :
Fondation ARC - À l'attention du Service Relations Testateurs - 9 rue Guy Môquet - 94803 Villejuif Cedex

Je souhaite recevoir une documentation sur les assurances-vie en faveur de la Fondation ARC

☐ Par voie postale ☐ Par courriel

☐ Mme ☐ M. Nom : ..... Prénom : .....

Adresse : .....

Code postal : ⌊_⌊_⌊_⌊_⌊_⌋ Ville : .....

Tél. : ⌊_⌊_⌊_⌊_⌊_⌊_⌊_⌊_⌊_⌊ Courriel : .....@.....

Et pour un échange privilégié, vous pouvez aussi joindre l'équipe Relations Testateurs : 01 45 59 59 01 / contacttestateurs@fondation-arc.org

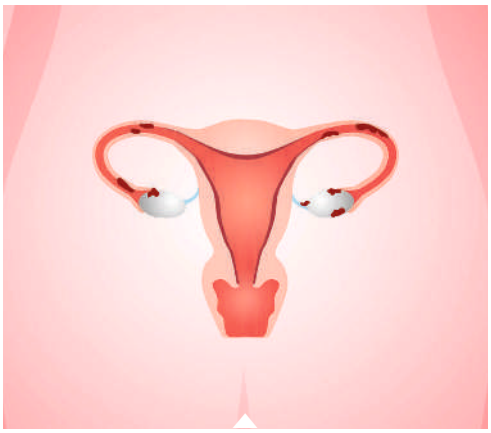
SAV21

Conformément à la loi Informatique et libertés du 6 janvier 1978, vous disposez d'un droit d'accès, de suppression et de rectification aux données personnelles vous concernant en vous adressant au siège de notre organisation.
© photos : Fondation Arc - Alexandre De Cadoudal / iStock

Une nouvelle piste thérapeutique contre l'endométriose

L'identification d'une mutation génétique pourrait permettre d'améliorer le traitement de cette maladie inflammatoire.

L'étude génétique de formes familiales de la maladie a permis à des chercheurs britanniques de l'université d'Oxford (Royaume-Uni) d'identifier une mutation génétique liée à des cas sévères d'endométriose. Caractérisée par la prolifération anarchique du tissu utérin (l'endomètre) dans l'abdomen, la maladie provoque des douleurs pelviennes pendant les règles ou les rapports sexuels chez environ 10 % des femmes. Son traitement reste très limité et repose sur la prise de la pilule ou la chirurgie dans les cas les plus graves. Mais la mutation génétique décrite dans la revue *Science Translational Medicine* ouvre une nouvelle piste thérapeutique. Le gène muté code en effet pour le récepteur du neuropeptide S, petite molécule participant à l'inflammation de l'endomètre et déjà en cause dans des cas de douleurs abdominales. En bloquant ce récepteur avec un inhibiteur, les auteurs ont réduit les symptômes de l'endométriose dans un modèle de la maladie chez la souris. Ces résultats éclairent un peu les mécanismes de cette maladie inflammatoire et offrent un moyen, pour la première fois, de pouvoir la traiter plus spécifiquement. **P. K.**



SHUTTERSTOCK

La prolifération de tissu hors de la cavité utérine caractérise l'endométriose.

EN DEUX MOTS

VIRUS. Les diabétiques de type 1 ont un pancréas plus fréquemment infecté par les entérovirus, principaux suspects désormais dans le déclenchement de cette maladie auto-immune. **CANCER.** Des signatures génétiques propres aux tumeurs pulmonaires chez les non-fumeurs (10 à 25 % des cancers du poumon) ont été identifiées. **TERRORISME.** 20 ans après le 11 septembre 2001, 75 % des sauveteurs intervenus lors de l'effondrement des Twin Towers souffrent de problèmes pulmonaires, cardiaques ou de cancer dus aux fumées toxiques.

Le danger des traumatismes crâniens répétés du sportif

NEUROLOGIE Plus un joueur subit de commotions, plus son débit sanguin dans son cerveau baisse en deux aires essentielles pour le mouvement et la coordination des gestes. C'est ce que montre une équipe qui a comparé les scanner cérébraux au débit sanguin relevé chez 228 athlètes dans la vingtaine pratiquant le football américain, le football ou le volley-ball. **H. R.**

SOURCE : NATHAN CHURCHILL, HÔPITAL SAINT-MICHAEL DE TORONTO, CANADA

SPA

Le débit sanguin cérébral est affecté par les commotions à répétition.

720 millions Le nombre d'hypertendus non traités

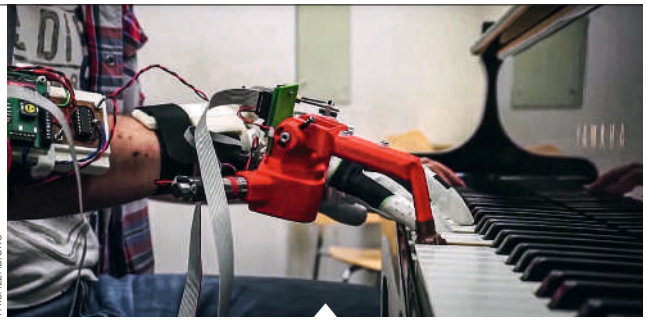
CARDIOLOGIE Commandée par l'Organisation mondiale de la santé et menée dans 184 pays, une vaste étude révèle que le nombre d'hypertendus est passé de 648 millions en 1990 à près de 1,3 milliard en 2019. Plus de la moitié d'entre eux, 720 millions, ne suivent pas de traitement. **S. R. M.**

SOURCE : BIN ZHOU, IMPERIAL COLLEGE LONDON, ROYAUME-UNI.

Pourquoi la migraine protège du diabète

BIOCHIMIE Migraineux ? vous serez moins susceptible de développer un diabète de type 2. Et vice-versa ! Des chercheurs ont reconstitué les cheminements de deux peptides dans l'organisme (CGRP et PACAP) connus pour leur importance dans les migraines et montrent qu'ils interfèrent avec la production d'insuline du pancréas. Plus les migraines sont violentes, plus ces peptides sont synthétisés, conduisant à la production d'insuline protectrice du diabète. **H. R.**

SOURCE : THANH DO, UNIVERSITÉ DU TENNESSEE, ÉTATS-UNIS.



FAISAL LAB.ORG

La prothèse est maîtrisée grâce à des signaux électriques.

Un doigt robot supplémentaire pour le piano

BIONIQUE Mis au point par des bio-ingénieurs, ce pouce supplémentaire robotisé s'est révélé assez contrôlable pour jouer du piano. Attachée à côté de l'auriculaire, la prothèse est maîtrisée par le porteur grâce à des signaux électriques déclenchés par les mouvements du pied. Le test, conduit chez six pianistes expérimentés et six novices, montre que ce dispositif est apte à reproduire une motricité fine. **H. J.**

SOURCE : ALI SHAFTI, IMPERIAL COLLEGE LONDON, ROYAUME-UNI.

38 % Le risque de vivre une pandémie

STATISTIQUES **Un individu né en 2000 avait 38 % de risques de connaître une épidémie de l'ampleur de celle du Covid-19 au cours de sa vie selon une étude dans les *PNAS* qui a rassemblé les données mondiales de 395 épidémies depuis 400 ans. Ce risque ne cesse d'augmenter, au point qu'il pourrait doubler dans les prochaines décennies. C. G.**

SOURCE : MARCO MARANI, UNIVERSITÉ DE PADOUE, ITALIE.

BRAVO LE LABO

ELKE GABRIEL

Cet organoïde cérébral a développé des proto-yeux

BIOLOGIE Des proto-yeux se sont développés sur cet organoïde, cultivé en laboratoire à partir de cellules souches pour reproduire les tissus cérébraux. Il a fallu 60 jours pour que ces deux vésicules rétiniennes émergent de ce « mini-cerveau », reproduisant ainsi les premières phases du développement du système visuel. **H. J.**

SOURCE : ELKE GABRIEL, INSTITUT DE GÉNÉTIQUE HUMAINE DE DUSSELDORF, ALLEMAGNE.

www.lesproduitsdumois.com

VITAMINE D POUR VOTRE IMMUNITÉ

Les mini-comprimés **D-immune** associent de la Vitamine D3, la forme de Vitamine D la mieux absorbée par l'organisme, à de l'huile d'Argousier pour maximiser son assimilation.

Un seul mini-comprimé par jour apporte 50 µg (2000 UI*) de Vitamine D, couvrant 1000% des Valeurs Nutritionnelles de Référence.

D-immune garantit un apport suffisant en Vitamine D au quotidien, essentiel pour **maintenir les défenses immunitaires, favoriser une bonne minéralisation osseuse et préserver une fonction musculaire optimale. Faire le plein de Vitamine D n'a jamais été aussi simple !**

*Unités Internationales

■ En pharmacie boîte de 90 mini-comprimés (3 mois de programme). Sans gélatine - ACL 6276968.
New Nordic au 01 85 12 12 12 (tarif local) - www.vitalco.com

Vertiges, pertes d'équilibre, instabilité ?

Vos troubles de l'équilibre impactent votre qualité de vie ? Vos troubles de l'équilibre sont dus à des altérations de la micro-circulation et au stress. Grâce à sa composition Unique et Naturelle, **AUDISTIM® ÉQUILIBRE VA VOUS SOULAGER !** L'écorce de pin maritime (EPM 150®) et le Gingembre améliorent la microcirculation, favorisent l'oxygénation cérébrale et contribuent à une bonne santé vasculaire. La Passiflore, l'Aubépine, le magnésium et le zinc diminuent le stress. Cure de 3 mois minimum. ■ En pharmacie www.audistimpharma.com
/// AUDISTIMPHARMA à votre écoute : 05 56 69 13 84

Vos acouphènes altèrent votre qualité de vie ?

AUDISTIM JOUR/NUIT VA VOUS SOULAGER !

Comprimés pelliculés sécables, Facilité de prise, Colorants naturels, Sans gélatine animale, Sans dioxyde de titane. Sifflements, bourdonnements, sommeil difficile, fatigue, stress, **AUDISTIM JOUR/NUIT nouvelle formule** va agir sur l'ensemble de ces symptômes (TRYPTOCETINE®), son efficacité est scientifiquement prouvée, 7 patients sur 10 déclarent connaître une baisse de la gêne liée à leurs acouphènes. Cures de 3 mois minimum.

■ En pharmacie, sur www.audistimpharma.com et à votre écoute au 05 56 69 13 84

POUR VOTRE SANTÉ, PRATIQUEZ UNE ACTIVITÉ PHYSIQUE RÉGULIÈRE
Pour paraître dans cette rubrique, R'Médias 01 46 48 85 41 - photos D.R.

La guerrière du Moyen Âge était un guerrier intersexe

Ce corps découvert en Finlande appartient à un homme atteint du syndrome de Klinefelter, caractérisé par un chromosome sexuel supplémentaire.

Homme ou femme ? La controverse durait depuis la mise au jour de ce corps en 1968 à Suontaka Vesitorninmäki, dans le sud de la Finlande. Mais l'analyse ADN des restes découverts dans une tombe du Moyen Âge, datée entre 1050 et 1300 de notre ère, montre que la personne qui gisait à côté de son épée était en fait… intersexe. Autrement dit, un homme atteint du syndrome de Klinefelter, caractérisé par un chromosome sexuel supplémentaire. Là où les femmes possèdent une paire de chromosomes XX et les hommes XY, ce personnage était donc XXY pour un total de 47 chromosomes au lieu de 46. C'est ce que révèle une étude finlando-germanique publiée dans *European Journal of Archeology* qui précise ainsi le caractère masculin mais infertile du guerrier.

Lors de la découverte du corps, les archéologues avaient reconstitué la vêture de l'individu, soit un vêtement de laine bleue, maintenu par deux broches situées sous les épaules, qualifié de « *costume féminin typique de l'époque* ». Mais, refusant l'idée qu'une femme ait pu être enterrée avec une telle arme, d'autres spécialistes avaient alors suggéré que la tombe avait abrité un double enterrement, le corps d'un homme se superposant à celui de sa compagne. L'épée aurait ensuite glissé sur le squelette féminin, tandis que les restes masculins auraient disparu. Il n'en est rien. « *L'individu était vêtu de vêtements chauds en laine et de fourrures, équipé de bijoux, d'une faucille, d'une épée, et placé sur une literie de plumes comme pour assurer un repos en douceur,* souligne l'archéologue Ulla Moilanen, de l'université de Turku (Finlande). *Cela suggère que l'attitude de ses contemporains envers lui n'était pas négative.* »

VERONIKA PASCHENKO

Le corps, vêtu d'un manteau de femme maintenu par deux broches, avait été enterré avec des épées (illustration).

Autorisé à exprimer son identité de genre

Il est donc possible, selon les chercheurs, que l'individu de Suontaka ne soit pas un chaman travesti ou une personne qui a été forcée à porter une tenue féminine, mais un individu respecté et autorisé à exprimer librement son identité de genre — ou sexe social. Le contexte de la tombe laisse à penser qu'il disposait même d'un statut relativement élevé dans la société. ■ **R. M.**

ARCHAEOLOGICAL PARK OF POMPEII

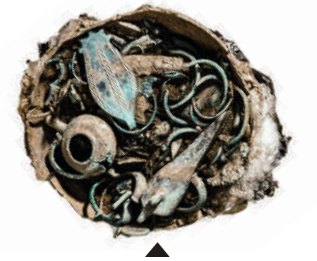
Le corps de l'acteur a été retrouvé relativement bien conservé.

On déclamait du grec à Pompéi

ANTIQUITÉ La tombe d'un célèbre acteur, Marcus Venerius Secundio, a été mise au jour dans la nécropole de Porta Sano, à Pompéi (Italie). Sur une plaque, est inscrit qu'il organisait des spectacles en grec, ce qui constitue la première preuve de l'usage de cette langue à Pompéi. Le corps de l'homme étant relativement bien conservé, une analyse des tissus restant sera menée afin de déterminer si la momification était intentionnelle. **M. M.**

SOURCE : L. ALAPONT, UNIVERSITÉ DE VALENCE, ESPAGNE.

Des objets de l'âge du bronze dans l'Allier



CYRIL FRÉSILLON / CNRS PHOTOTHÈQUE

Torques, bracelets, lames de hache font partie des dépôts d'objets mis au jour.

ARCHÉOLOGIE Des fouilles menées dans l'Allier ont révélé des dépôts d'objets au sein d'un habitat fortifié de l'âge du bronze (-3000 ans). Outre leur quantité, c'est la disposition intacte des vestiges qui a marqué les chercheurs. L'organisation des dépôts pourrait signifier qu'ils ont servi d'offrandes, au moment de la fondation ou de l'abandon de l'habitat. **M. M.**

SOURCE : P.-Y. MILCENT, UNIVERSITÉ DE TOULOUSE JEAN-JAURÈS, FRANCE.

Concepteur
et fabricant
FRANÇAIS

Douches Kinedo

présente

Kinemagic

Pour éviter les chutes dans la salle de bain,

remplacez votre baignoire par une douche luxueuse et sécurisée.

100% sécurisé

Pose en 48h sans gros travaux

Devis gratuit

VU À LA TV

Fabrication française

PLUS D'INFORMATIONS

par téléphone
0 800 05 06 07 Service & appel gratuits

par internet
www.kinemagic.fr

par courrier
en retournant la demande de devis personnalisé et gratuit
Coupon à envoyer à :
AQUAPRODUCTION
LIBRE RÉPONSE 51045
44680 SAINTE PAZANNE

❑ Oui, je souhaite en savoir plus sur la douche Kinemagic et bénéficier d'un **DEVIS GRATUIT** sans engagement de ma part.

Nom : ..... Prénom : .....

Adresse : .....

.....

CP : ..... Ville : .....

Téléphone : .....

Email : .....

N'affranchissez pas ce courrier, nous vous offrons les frais postaux.

Kinemagic - Paris Match

Van Eyck, maître des points de fuite

Les perspectives dans les tableaux du peintre flamand ont été analysées grâce à la vision par ordinateur.

Sujet disputé chez les historiens, l'art de la perspective chez le primitif flamand Jan van Heyck (1395-1441) a été analysé par un spécialiste en informatique et réalité augmentée de l'université de Lorraine. Gilles Simon a étudié les œuvres du peintre en utilisant et réadaptant des algorithmes conçus à l'origine pour détecter automatiquement des points de fuite dans des photos et des vidéos. Les résultats, présentés à la conférence Siggraph — la plus grande réunion annuelle mondiale dédiée à l'infographie —, montrent que l'artiste suivait des règles d'optique de façon systématique, et non pas empirique ou intuitive. La plupart des tableaux s'avèrent structurés autour d'une succession en ligne droite de quatre points de fuite équidistants. Une précision telle qu'elle ne peut que s'appuyer sur l'usage d'un dispositif à perspective, un instrument associé jusque-là aux artistes et théoriciens de la Renaissance ou à l'Allemand Albrecht Dürer (1471-1528). *« L'idée que van Eyck puisse s'aider d'une machine passe mal,* reconnaît Gilles Simon. *Or cela ne diminue pas le génie de l'artiste, au contraire.* » **A. D.**

UNIVERSITÉ DE LORRAINE 2021

Un dispositif à perspective (illustration ci-contre) permettait à l'artiste de définir des points de fuite équidistants dans ses œuvres (ici visualisation des lignes de fuites dans « Les Époux Arnolfini »).

EN DEUX MOTS

JOYAUX. Deux bracelets ayant appartenu à la reine Marie-Antoinette, couverts d'une centaine de diamants, seront mis aux enchères publiques le 9 novembre à Genève. **CLIMAT.** L'analyse d'anciennes matières fécales montre que la taille de la population maya dans la ville de basse altitude d'Itzan (au nord de l'actuel Guatemala) variait en fonction des changements climatiques. **PATRIMOINE.** Les vestiges des communautés juives allemandes médiévales de Spire, Worms et Mayence entrent au patrimoine mondial de l'Unesco.

9000 ans

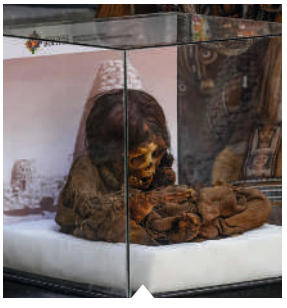
L'âge de la plus ancienne bière chinoise

ARCHÉOLOGIE Une équipe sino-américaine a trouvé des résidus de bière de riz sur les poteries mises au jour à Qiaotou, site datant des débuts de la sédentarisation il y a entre 8700 et 9000 ans, dans la province du Zhejiang dans l'est de la Chine. Deux corps et les traces d'un édifice cérémoniel près des poteries suggèrent que le breuvage était consommé lors de rites funéraires. **M. M.**

SOURCE : J. WANG, DARTMOUTH COLLEGE, ÉTATS-UNIS.

La Bolivie rebaptise une momie restituée

PATRIMOINE
Le gouvernement bolivien a organisé une cérémonie pour rebaptiser la momie d'une fillette d'environ 8 ans ayant vécu au début du XVe siècle. Conservée plus d'un siècle au musée de l'université du Michigan aux États-Unis, la momie avait été rendue à son pays d'origine en 2019. Deux ans plus tard, celle qui était connue sous le nom de Ñusta, « princesse » en langue quechua, a été renommée Saphi, « racines » en aymara, culture dont la petite fille était issue. **M. M.**



AP/SIPA

La momie de la fillette du XVe siècle a été renommée Saphi.

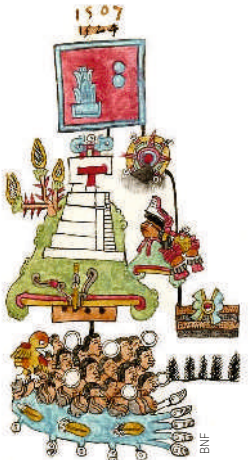
Un site funéraire sous le green de golf

PROTOHISTOIRE À l'occasion de travaux effectués dans un étang du golf de Tetney, dans le nord-est de l'Angleterre, des ouvriers ont découvert un site funéraire de l'âge de bronze abritant un cercueil creusé dans un tronc d'arbre de 3 mètres de long. Gorgé d'eau, celui-ci contenait les restes d'un homme qui, selon les archéologues, a été enterré il y a environ 4000 ans. Une hache parfaitement conservée accompagnait le défunt. **B. A.**

Les pictogrammes aztèques racontent les séismes

PHILOLOGIE Dans le codex Telleriano-Remensis, un manuscrit aztèque du XVI[e] siècle, deux signes sont associés pour désigner les séismes survenus entre 1460 et 1542 : *ollin* (le mouvement), un glyphe composé de 4 hélices, et *tlalli* (la terre), montrant des couches ornées de points. Il s'agirait des premières preuves écrites de secousses sismiques survenues au Mexique à l'époque préhispanique. **R. M.**

SOURCE : GERARDO SUAREZ, UNIVERSITÉ NATIONALE AUTONOME DE MEXICO, MEXIQUE.



BNF

Pictogrammes rapportant un séisme en 1507.

88,9 mm Les précipitations annuelles qui ont poussé « sapiens » hors d'Afrique

PALÉOCLIMATOLOGIE Selon de nouveaux calculs paléoclimatiques, un seuil pluvieux précis a été nécessaire pour permettre à *Homo sapiens* de se déployer hors d'Afrique, en lui permettant de suivre des corridors verts. Trois fenêtres climatiques clémentes avec des pluies annuelles supérieures à 88,9 mm se seraient ainsi ouvertes entre -275 000 ans et -65 000 ans. **R. M.**

SOURCE : ROBERT M. BEYER, POTSDAM INSTITUTE FOR CLIMATE IMPACT RESEARCH, ALLEMAGNE.

GETTY IMAGES

L'éthnie ayta a le plus haut niveau d'ascendance de Denisova.

Un peuple des Philippines présente 5 % d'ADN de Denisova

PALÉOANTHROPOLOGIE Les Papous constituaient jusqu'ici la population avec le plus haut taux d'ADN hérité des dénisoviens. Une étude suédoise révèle qu'un peuple philippin, les Ayta, a un taux supérieur d'environ 5 %. Cela renforce l'idée qu'il y a eu plusieurs rencontres entre *H. sapiens* et *H. denisovensis*, et relance l'hypothèse selon laquelle les restes humains retrouvés en Asie du Sud-Est sont liés à Denisova. **M. M.**

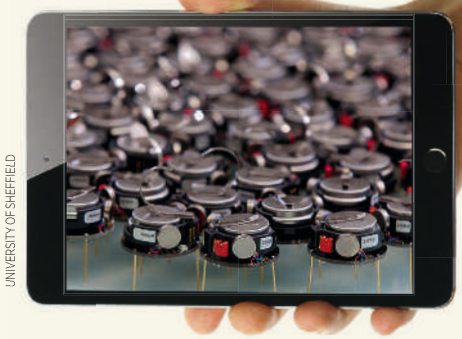
SOURCE : M. LARENA, UNIVERSITÉ D'UPPSALA, SUÈDE.

www.sciencesetavenir.fr
www.larecherche.fr
Sciences et Avenir et *La Recherche* au quotidien

TECHNOLOGIE

Comment les essaims de robots prennent des décisions

Fourmis, abeilles, oiseaux, poissons… Le comportement des animaux sociaux est une source inépuisable d'inspiration pour apprendre à des groupes ou « essaims » de machines à coordonner leurs activités et prendre la meilleure décision. Et pour travailler de concert, la qualité des communications l'emporte sur la quantité d'informations échangées montrent deux études décryptées sur le site de *La Recherche*. https://bit.ly/3A7GffR


UNIVERSITY OF SHEFFIELD

SANTÉ

Retrouvez les actualités du Covid-19 sur le Web

Dernières infos sur les données d'efficacité vaccinale, suivi des effets indésirables, enquêtes et décryptages sur le Covid long, l'utilité des capteurs de CO_2 dans les lieux clos, les troubles origines du virus… Toute l'actualité scientifique du Covid-19 à retrouver sur le site de *Sciences et Avenir*. sciav.fr/Covid-19

POUR TOUT SAVOIR DE LA SCIENCE

SI VOUS AVEZ…

2 minutes

Animaux Le tigre de Tasmanie « revit »

AFP

L'Agence australienne des archives a colorisé l'ancienne vidéo d'un tigre de Tasmanie pour redonner un peu de vie à cette espèce disparue depuis plusieurs décennies. sciav.fr/896tigre

5 minutes

High-tech Le cyber-terrorisme, nouveau risque

AFP

Reportage au Forum international de la cybersécurité à Lille, où les experts envisagent de potentielles attaques terroristes sur les hôpitaux, les réseaux d'énergie… sciav.fr/896cyber

10 minutes

Anthropologie. Agriculture et immunité

AKG IMAGES

Il y a 8000 ans, l'agriculture se développait en Europe, et avec ce nouveau mode de vie un plus grand risque d'infections. Voici comment notre système immunitaire s'est adapté. sciav.fr/896agriculture

Vous êtes déjà 2 millions à nous suivre sur Facebook

Langage, mémoire, attention…

Les super pouvoirs du cerveau

Bonne nouvelle, la science peut donner un coup d'accélérateur à nos capacités d'apprentissage quel que soit l'âge ! Grâce à la connaissance de l'extraordinaire élève qu'est notre cerveau, « Sciences et Avenir » livre les clés indispensables pour apprendre et retenir efficacement.

Dossier réalisé par
Elena Sender

INTERVIEW
Stanislas Dehaene, professeur au Collège de France p. 30

DÉCRYPTAGE
Comment fonctionne la mémoire p. 33

PRATIQUE
Les 7 clés de l'apprentissage p. 34

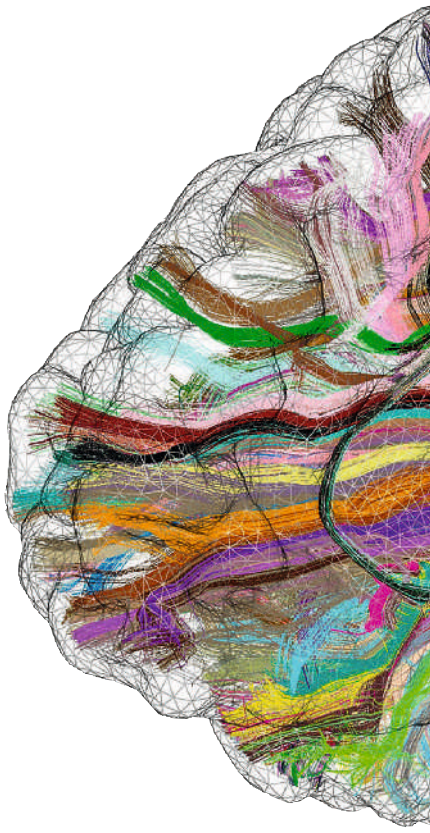
ALIMENTATION
Bien nourrir son cerveau pour apprendre p. 41

JOHN M LUND PHOTOGRAPHY INC/ GETTY IMAGES

INTERVIEW

STANISLAS DEHAENE, PROFESSEUR AU COLLÈGE DE FRANCE

« L'efficacité du cerveau humain reste inégalée »



Notre cerveau a un super-pouvoir, celui d'apprendre pour s'adapter en permanence à l'environnement. Pour le chercheur en neurosciences Stanislas Dehaene, il est fondamental de mieux comprendre la biologie de cette capacité pour la renforcer.

La science peut aider à apprendre ! Telle est l'excellente nouvelle qu'apporte Stanislas Dehaene, titulaire de la chaire de psychologie cognitive expérimentale au Collège de France et président du Conseil scientifique de l'Éducation nationale. Il est aussi la figure de proue française d'un mouvement international, nommé « éducation fondée sur des données probantes » (en anglais *evidence-based education*) qui évalue par des méthodes expérimentales rigoureuses les effets de différentes pratiques pédagogiques. Fort de trente ans d'études et d'expériences, notamment dans l'Unité de neurosciences cognitives qu'il dirige au centre Neurospin (CEA, Saclay), il livre à *Sciences et Avenir* les clés de l'apprentissage. Des clés qui, lorsqu'on les utilise, permettent au cerveau humain de mieux apprendre à apprendre.

Alors que les progrès du* machine learning *(apprentissage de la machine) sont époustouflants, qui, du cerveau humain ou de la machine, apprend le mieux ?

À l'heure actuelle, l'efficacité du cerveau humain reste inégalée dans le domaine de l'apprentissage. Tout d'abord parce qu'il a une capacité unique d'abstraction. Alors que la machine n'analyse la présence d'un objet que sur des éléments anecdotiques de l'image (couleur, forme…), l'humain reconnaît l'essence même d'un objet par sa capacité de raisonnement et d'abstraction. Il distingue une chaise par exemple même si elle n'est qu'un seul pied de métal plié. Et il en va ainsi du concept de tous les objets, animaux etc. De plus, le cerveau humain est incroyablement rapide pour apprendre. Une publication montre que l'intelligence artificielle (IA) de l'entreprise britannique DeepMind a dû accumuler 900 heures de jeu sur une console Atari pour atteindre un niveau qu'un être humain a atteint en deux heures ! Ou encore, selon une étude du linguiste Emmanuel Dupoux, directeur d'étude à l'École des hautes études en sciences

POUR EN SAVOIR PLUS

▸ **Face à face avec son cerveau,** Stanislas Dehaene, Odile Jacob, 216 p.

CEA - BENOIT DECOUT/REA

Stanislas Dehaene est titulaire de la chaire de psychologie cognitive au Collège de France et président du Conseil scientifique de l'Éducation nationale.

sociales (EHESS, Paris), un enfant apprend sa langue maternelle en entendant de 500 à 1000 heures de parole par an alors que les meilleurs systèmes informatiques existant exigent de 20 à 1000 fois plus de données. Autre caractéristique : contrairement aux machines, l'apprentissage humain est social, il se transmet. Plus que des *Homo sapiens,* nous sommes des *Homo docens* (qui enseignent). C'est grâce à ces extraordinaires capacités d'apprentissage et de transmission du savoir que l'espèce humaine a survécu.

Quelle caractéristique de notre cerveau permet ces prouesses ?
L'espèce humaine bénéficie d'une enfance prolongée. Elle dure plus de vingt ans, ce qui correspond à une période de plasticité cérébrale extrême où le cerveau se modèle. Dès la naissance, les grands faisceaux de connexion sont en place, mais par la suite, les connexions et les réseaux neuronaux se modifient à chaque apprentissage. Cette plasticité inouïe permet à l'humain de s'adapter en permanence à son environnement. Elle est stimulée entre autres par cette invention humaine formidable qu'est l'éducation. Grâce à elle un bébé peut devenir en vingt ans ingénieur, musicien, ébéniste ou programmeur ! Le problème c'est que si le système éducatif perd en efficacité, ces acquis peuvent s'effondrer. C'est ce qui nous inquiète au regard

> “Le fait de connaître son propre fonctionnement est l'un des moyens les plus efficaces pour progresser”

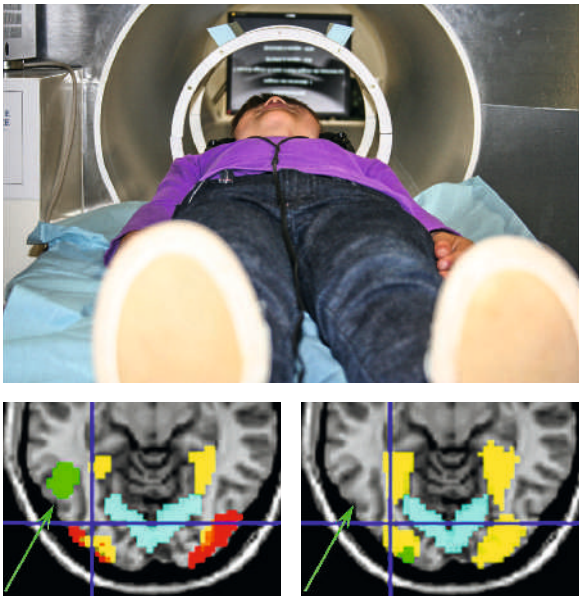
des résultats des derniers tests d'évaluation internationaux.

Que disent ces tests et comment y remédier ?

La France stagne (23e sur 79 pays) au classement OCDE Pisa (Programme international pour le suivi des acquis des élèves de 15 ans) et arrive bonne dernière des pays d'Europe au test TIMMS (*Trends in International Mathematics and Science Study*) en 2019, qui évalue les performances des élèves en sciences et mathématiques en CM1 et en 4e. C'est catastrophique. Il faut réagir. C'est pourquoi la science se met au service de l'école. Grâce à la recherche sur les mécanismes cognitifs et cérébraux des apprentissages, nous comprenons mieux le fonctionnement de la plasticité cérébrale. Dans mon ouvrage *Apprendre* (Odile Jacob, 2018), j'identifie ainsi quatre fonctions cérébrales majeures qui maximisent la vitesse avec laquelle nous apprenons. Le fait de connaître son propre fonctionnement — la métacognition — est un des moyens les plus efficaces pour progresser.

Quels sont ces quatre piliers à connaître ?

Le premier d'entre eux est l'attention *(lire p. 34)*. Un ensemble de circuits neuronaux qui amplifient l'information sur laquelle nous nous concentrons et décuplent la profondeur de l'apprentissage. Le deuxième pilier est l'engagement actif. Un cerveau passif n'apprend rien. Pour réussir, il doit sans arrêt générer activement des hypothèses avec la curiosité comme moteur. Le troisième principe est le retour sur erreur. Il faut comparer nos prédictions avec la réalité, dédramatiser et se corriger. Enfin, grâce à la répétition des notions, entrecoupée de périodes de sommeil, notre cerveau transfère ses acquis dans la mémoire à long terme. C'est la consolidation, qui permet d'automatiser les notions et de libérer les ressources intellectuelles pour d'autres objectifs.



G. DEHAENE-LAMBERTZ, K. MONZALVO, S. DEHAENE, « APPRENDRE », ED. ODILE JACOB

L'IRM montre qu'une région, apparentée aux lettres et aux chaînes de lettres, apparaît dans le cerveau d'un enfant lecteur de 6 ans (en vert à gauche) contrairement à un non-lecteur (à droite).

Tout le monde peut ainsi tout apprendre ?

Il faut avoir confiance dans sa propre capacité cérébrale. Lorsque se présente une difficulté, une attitude, que j'appelle « fixiste », consiste à dire : *« je n'ai pas l'intelligence pour, je suis nul »*. La seconde attitude, « plastique » revient à se dire : *« je vais devoir faire un effort supplémentaire pour y arriver »*. C'est cette dernière qui est, scientifiquement parlant, la plus juste. Sauf cas particulier de troubles de l'apprentissage, tout le monde peut apprendre, pourvu qu'il y consacre un effort.

Quels sont finalement les pires ennemis de l'apprentissage ?

L'ennui et la distraction sont les ennemis de l'attention et de l'engagement actif. Attention aussi aux contenus pédagogiques sur écran. Ils peuvent être intéressants mais des études récentes ont montré que le traitement de l'information lue sur un écran est moins profond que sur papier. Enfin, l'apprentissage dit par la découverte (qui consiste à laisser l'élève tout seul face à un contenu pour qu'il explore) ne fonctionne pas. L'interaction avec l'enseignant est cruciale. Il ne sera jamais remplacé par une machine, même si les logiciels pédagogiques peuvent aider à automatiser les connaissances.

Comment voyez-vous le futur de la recherche sur l'apprentissage ?

Il faut étudier la biologie de l'apprentissage, la possibilité de rouvrir potentiellement des fenêtres de plasticité cérébrale. Cela pourrait permettre de venir en aide aux patients victimes de lésions cérébrales qui leur ont fait perdre des facultés. L'autre axe de recherche c'est comprendre comment le cerveau apprend toutes les formes de langages (grammatical, mathématique, musical…). Trouver ce qui fait de nous des machines apprenantes uniques. Notre algorithme neuronal, en quelque sorte. ■

Propos recueillis par E. S.

> “Sauf cas particulier de troubles de l'apprentissage, tout le monde peut apprendre pourvu qu'il y consacre un effort”

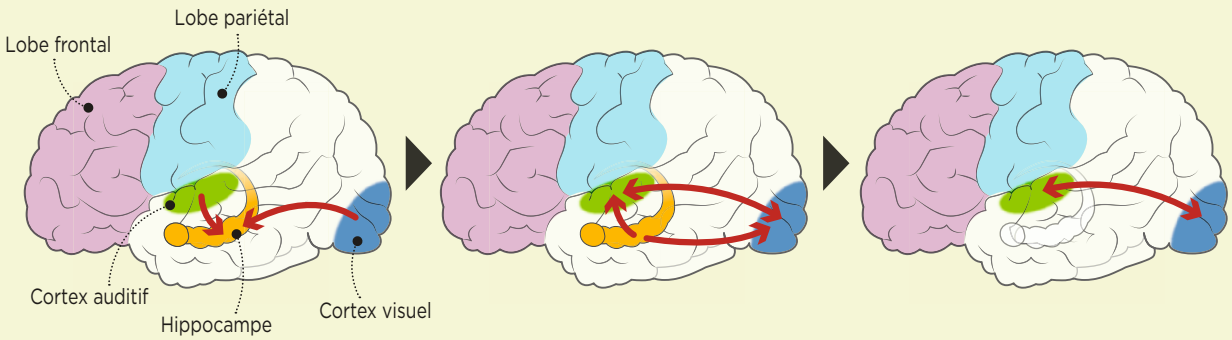
DÉCRYPTAGE

Mémorisation : mission récupération

Connaître les trois phases de la mémoire, et leur fonctionnement, permet de mieux s'en servir.

Virginie a un long chapitre d'histoire à apprendre pour un contrôle dans deux semaines. Comment être au point le jour j ? *« L'étude de la mémoire a révélé qu'elle fonctionne en trois phases, l'encodage, la consolidation et la récupération, mettant en jeu différents réseaux neuronaux »*, explique le professeur Francis Eustache, directeur de l'unité Inserm Neuropsychologie et imagerie de la mémoire à Caen. La première phase, l'encodage, c'est *« l'entrée de l'information dans le système »* poursuit-il. Le critère n° 1 d'un encodage réussi c'est le maintien d'un état élevé d'attention *(lire p. 34)*, qui implique les lobes frontal et pariétal, afin que l'information soit traitée en profondeur. *« C'est le contraire du superficiel, du zapping,* poursuit Francis Eustache. *Pour y parvenir il faut comprendre l'information, la mettre en relation avec ce que l'on sait déjà. »* Une fois l'encodage réalisé, vient le stockage ou « consolidation », qui sollicite l'hippocampe, une structure cérébrale qui va rejouer en boucle l'information et l'aider à s'enraciner dans notre mémoire à long terme. Comment favoriser cette étape ? Par la répétition, mais pas n'importe comment. Si Virginie estime qu'il lui suffira de lire son cours, elle se trompe. *« La consolidation est favorisée par la multiplication des modes de mémorisation actives (quiz, schémas, reformulations, questionnements…) qui implique une mise à l'épreuve de la mémoire »*, précise Francis Eustache. Le psychologue américain Henry Roediger, de l'université Washington, et son équipe ont démontré l'immense bénéfice de se tester. Dans une étude de 2010, des élèves répartis en trois groupes ont dû mémoriser une liste de mots sur huit séances. Le groupe 1 disposait de huit séances d'étude simple, le groupe 2 de six séances d'étude et deux tests, le groupe 3 de quatre séances d'étude et quatre tests. 48 heures plus tard, les résultats sont sans appel : le groupe 3 a un pourcentage de rappel de mots de 39 %, contre 25 % dans le groupe 2 et 17 % dans le groupe 1 sans test. *« La pratique de récupération répétée a amélioré la rétention à long terme, tandis que l'étude répétée n'a produit essentiellement aucun avantage »*, estime Henry Roediger. Faire un test de mémoire évalue non seulement ce que l'on sait, mais améliore aussi la rétention ultérieure, un phénomène connu sous le nom « d'effet de test ». Ces tests de « récupérations en mémoire », troisième étape cruciale de la mémorisation, gagnent à être échelonnés dans le temps. *« Les premières répétitions ont tout intérêt à être espacées de 24 heures notamment pour permettre au sommeil de faire son travail de renforcement,* précise Francis Eustache. *Puis l'intervalle peut ensuite s'accroître pour garantir une mémoire durable. »* Armée de toutes ces informations, Virginie devrait briller à la prochaine interrogation.

BRUNO BOURGEOIS



1- L'encodage. Le cortex visuel capte les images et le cortex auditif enregistre les sons. L'hippocampe associe les informations. Les lobes frontal et pariétal maintiennent l'attention.

2- La consolidation. Grâce à la répétition et au sommeil, l'hippocampe rejoue l'association jusqu'à en faire une trace mnésique durable dans le cortex.

3- La récupération. La trace mnésique est suffisante pour rappeler l'information sans plus faire appel à l'hippocampe. Elle est « apprise ».

Les 7 clés de l'apprentissage

Pour apprendre efficacement, plusieurs règles peuvent être tirées des études scientifiques récentes. Nous décryptons ici les plus essentielles, qui s'appliquent à tous et dans tous les domaines.

1 Maîtriser son attention

À chaque instant, notre cerveau est bombardé de pensées et de signaux sensoriels attractifs. Pour lutter et rester concentrés, nous sommes dotés d'un système cérébral puissant qui privilégie certains signaux et en inhibe d'autres, c'est l'attention. *« Focaliser son attention sur un objet de pensées rend aveugle à d'autres stimulations,* note Stanislas Dehaene, professeur en psychologie cognitive au Collège de France. *L'attention amplifie l'information et décuple son apprentissage.* » *« Un cerveau attentif s'implique beaucoup plus, réagit mieux, comprend mieux et mémorise mieux,* ajoute Jean-Philippe Lachaux, chercheur à l'Inserm en neurosciences cognitives. *On ne peut quasiment rien appendre sans une capacité d'attention stable.* »

Les réseaux neuronaux de l'attention sont connus depuis une décennie. En 2021, l'équipe de Llaria Sani, de l'université Rockfeller aux États-Unis, en a affiné la définition. Une étude d'imagerie cérébrale chez 12 sujets a montré que l'attention est pilotée par un réseau neuronal à trois « nœuds », chacun étant situé dans un lobe différent du cortex. En situation d'apprentissage, l'enjeu est d'apprendre à piloter ce système complexe pour l'entraîner à rester fixé sur la cible visée. Ce qui n'est pas facilité par le monde moderne. *« Notre cerveau aime ce qui est brillant, sonore, nouveau, ce qui nous émeut, nous obsède, ou bien ce que nous avons l'habitude de faire,* explique Jean-Philippe Lachaux. *Avec les écrans, les cibles attentionnelles possibles se sont multipliées.* » Comment résister ? Son équipe a élaboré le programme ATOLE (Attentif à l'école), gratuit, accessible aux enseignants et dont ont déjà bénéficié 100 000 élèves de l'école élémentaire. Enfants, adolescents, adultes, tout le monde peut en bénéficier. Les principes de base ? Bien sûr on peut éloigner les sources de distraction. Mais le mieux est encore d'apprendre à maîtriser le système attentionnel, notamment en comprenant que le cerveau « multitâche » n'existe pas. *« C'est comme si on essayait de faire deux bras de fer en même temps,* rappelle Jean-Philipe Lachaux. *Le cerveau passe d'une tâche à l'autre, en se déconnectant et se reconnectant en permanence, ce qui n'est pas efficace.* » Pour rester actif, il faut donc proscrire *« les situations où il y a risque de faire plus d'une tâche à la fois* ». Pour ce faire on peut apprendre à rester concentré quelques minutes de suite en faisant des « bulles » ! *« J'appelle*

BENOIT DECOUT/REA

> “Focaliser son attention sur un objet de pensées rend aveugle à d'autres stimulations”
>
> **Stanislas Dehaene,** professeur en psychologie cognitive au Collège de France

DANIEL DERAJINSKI / HANS LUCAS

Se projeter sur une cible claire (ici réaliser un alphabet) en décomposant les tâches pour y parvenir et les réaliser les unes après les autres permet de maintenir son attention.

"bulles" de courts moments pendant lesquels sont mis entre parenthèses tous nos objectifs sauf un sur une durée très limitée : faire une course, écrire un e-mail… Elles risquent d'autant moins d'exploser qu'elles sont courtes », raconte Jean-Philippe Lachaux. À l'intérieur de ses bulles temporelles d'attention, *« le système est toujours à l'affût d'éléments importants autour de nous qui peuvent faire voler notre bulle en éclat, et notre cerveau (circuit de la récompense) est toujours en quête de plaisirs immédiats. Alors il faut apprendre à reconnaître les signes avant-coureurs de la distraction (posture, agitation).* »

De manière générale, mieux vaut aussi éviter d'avoir deux intentions en même temps et se projeter sur une cible claire. Puis, *« comme une intention est vite oubliée on peut la décomposer en tâches simples faciles à exécuter, que l'on va réaliser les unes après les autres : des mini-missions* ». D'après le spécialiste, le cortex préfrontal — « P-DG » de notre cerveau — affectionne ces mini-missions, *« séquences simples aux règles bien établies »*. Ces quelques règles valent pour toutes les situations d'apprentissage. Afin que, dans ce monde moderne de distraction, tout un chacun reprenne le pouvoir de son attention.

2 Engager activement son cerveau

« Apprendre c'est changer son cerveau, rappelle judicieusement à *Sciences et Avenir* Steve Masson, professeur en neuroéducation au département de didactique de l'université du Québec à Mon-

ÉDUCATION

Les 5 premières années qui changent tout

L'éducation précoce modèle-t-elle le cerveau humain ? Oui, selon l'étude Abecedarian publiée en juin dans le *Journal of cognitive Neuroscience* par les scientifiques de Virginia Tech Carilion (VTC), aux États-Unis. 47 enfants de milieux défavorisés ont été suivis depuis leur naissance en 1971. Tous ont bénéficié d'un programme de santé, nutrition et soutien social. Cependant, à partir de l'âge de 6 semaines, 29 enfants ont reçu en plus un soutien éducatif, axé sur la promotion du langage, de la cognition et de l'apprentissage interactif, cinq jours par semaine, pendant cinq ans. Trois décennies plus tard, des IRM structurelles du cerveau des participants ont été réalisées. Résultat : il existe une relation entre la structure du cerveau adulte et les cinq années d'éducation enrichie, soulignent les auteurs. *« Nous avons démontré que chez les enfants vulnérables qui ont reçu des expériences d'apprentissage stimulantes et émotionnellement favorables, des changements statistiquement significatifs dans la structure du cerveau apparaissent à l'âge mûr »*, affirme Craig Ramey, auteur principal de l'étude. Les participants du groupe « éducation » présentaient en effet une taille accrue de l'ensemble du cerveau dans cinq régions impliquées dans le langage et la cognition. D'où l'importance d'un *« apprentissage positif et un soutien socio-émotionnel »* précoce.

tréal (Canada), auteur d'*Activer ses neurones (Odile Jacob 2020). C'est modifier la façon dont les neurones sont interconnectés.* »
Et pour transformer son cerveau, il prône, à l'instar de Stanislas Dehaene, de garder celui-ci dynamique dans un engagement actif. *« Ce qui signifie éviter la passivité »*, précise le chercheur québécois. Pour cela, un enseignement interactif est généralement bien plus efficace qu'un cours passif où l'élève ne fait qu'écouter des explications.
Dans une méta-analyse publiée dans les *PNAS* en 2014, Scott Freeman, de l'université de Washington à Seattle (États-Unis), a passé en revue 225 études comparant l'efficacité d'un enseignement magistral ou interactif en sciences, mathématiques ou ingénierie. Les résultats montrent qu'un apprentissage actif apporte une amélioration des notes de 6 % et une diminution de 12 % du nombre d'étudiants en échec. *« L'enseignement magistral où l'étudiant n'a pas de possibilités de questions immédiates est associé à une plus faible probabilité d'activation que les approches plus participatives »*, commente Steve Masson, qui reconnaît néanmoins que le cours magistral a l'avantage de délivrer beaucoup d'informations. L'écoute et la lecture simples peuvent aussi être actives pourvu que l'on se concentre.

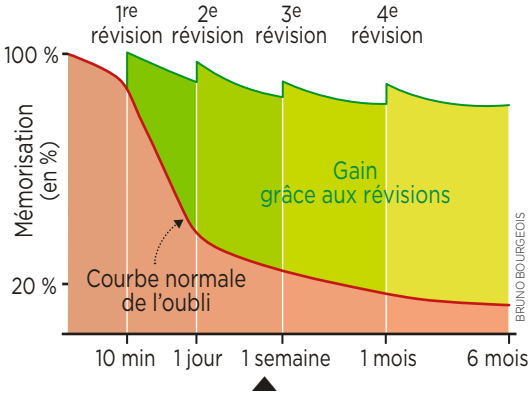
3 Se tester pour retenir les savoirs

« Après avoir été attentif à un cours, une leçon, l'une des façons les plus efficaces de retenir les savoirs est de se tester », assure Steve Masson. Lire ou relire ses notes n'est en revanche que très peu utile. *« Si une tâche (la lecture du cours) est trop facile, elle active à peine le cerveau, ne crée pas de nouvelles connexions,* poursuit le spécialiste. *Le changement est très modeste.* » En revanche, s'autoquestionner et élaborer des explications mettent en œuvre une fonction de « récupération en mémoire » des informations du cerveau *« qui est, selon les études, l'exercice considéré comme le plus puissant dans l'apprentissage* [lire p. 33] ». *« Ne pas relire mais plutôt essayer de se souvenir »*, tel est le *credo* des spécialistes. En pratique, *« au lieu de relire ses notes, l'étudiant doit prendre une feuille blanche et se tester »*, assure Steve Masson. Cela consolidera les réseaux de neurones impliqués et ils seront plus faciles à réactiver. *« Un changement de paradigme est pour cela nécessaire,* remarque le chercheur. *Il faut percevoir les tests comme faisant partie intégrante du processus d'apprentissage et non uniquement comme un outil de vérification de réussite. »*

Pour l'élève, prendre une feuille blanche et tester ce que l'on a retenu d'un cours ou d'une leçon est beaucoup plus efficace que de les relire pour bien mémoriser.

4 Profiter de ses erreurs

Mais lorsque l'on se teste, il arrive que l'on échoue. *« Pour progresser, l'enfant doit aussi échouer à condition que ce signal de* feedback [retour d'information], *non punitif, lui indique la bonne voie »*, estime Stanislas Dehaene. Tous les spécialistes s'accordent à le dire : l'erreur et sa correction doivent être au centre du processus d'apprentissage. *« Une étude avec une modélisation informatique suggère qu'un taux de réussite de 85 % et 15 % d'erreurs serait idéal pour optimiser l'apprentissage,* appuie Steve Masson. *Il faut faire quelques erreurs, mais pas trop pour ne pas se décourager. »*
Chaque erreur doit être corrigée : *« Pour qu'une personne apprenne, il faut que son entourage lui fournisse le plus rapidement possible*



La courbe de l'oubli. Une notion apprise à un instant t sera rapidement oubliée, à moins qu'elle ne soit révisée dans des intervalles de temps de plus en plus espacés.

FLORE-AËL SURUN / TENDANCE FLOUE

un retour sur erreur, souligne Stanislas Dehaene. *Ce qui n'a rien à voir avec une note sèche sans explication, équivalente à une sanction. L'idéal est un retour rapide et détaillé, pas des semaines après le contrôle.* »

L'importance est colossale. John Hattie chercheur à l'université de Melbourne (Australie) a exploré 800 méta-analyses pour en tirer un classement des facteurs clés de la réussite scolaire. En haut du podium arrive le « *feedback* de l'enseignant », et en deuxième place, « la relation de confiance avec l'enseignant ». Autant dire que le retour sur erreur et la manière de le faire sont fondamentaux. « *On touche là aussi à la question de la motivation,* poursuit Steve Masson. *Quand on réussit, une région du cerveau, le striatum, incluse dans le circuit de la récompense, secrète de la dopamine, provoquant du plaisir et de la satisfaction. C'est un élément contributif à la motivation.* » Ce qui expliquerait le manque de motivation des élèves vivant beaucoup d'échecs et peu de succès. « *D'où l'intérêt de proposer des défis qui soient à la hauteur des apprenants et jugeant bien le niveau de difficulté* », conclut le chercheur.

5 Espacer pour consolider

Se tester et se corriger, oui, mais pas sans arrêt. En 2021, l'équipe d'Ethan Buch, neurologue aux Instituts nationaux de la santé américains (NIH), a publié une étude révélant le bénéfice de faire des pauses. 33 volontaires ont été chargés d'exécuter une tâche (taper une suite de chiffres) le plus rapidement possible pendant 10 secondes, suivies de 10 secondes de repos, plus de 30 fois de suite, alors que l'activité de leur cerveau était enregistrée par magnétoencéphalographie. Et là, surprise ! pendant les périodes de pause, les chercheurs ont observé une sorte de « replay neuronal » dans le cerveau des volontaires, durant 50 millisecondes. Comme si le cerveau récapitulait les nouvelles informations en vitesse accélérée. Un processus inconscient, qui permettrait aux tout nouveaux souvenirs d'être mémorisés. Selon les chercheurs, mieux vaut donc entrecouper les sessions d'apprentissage de pauses régulières.

Ce n'est pas tout. Autre règle d'or : il faut « *distribuer les périodes d'entraînement plutôt que les agglomérer* », précise Stanislas Dehaene. Pourquoi ? Margaret Bradley, de l'université de Floride (États-Unis), révèle dans une étude d'imagerie cérébrale (*Human Brain Mapping*, 2015) que le regroupement des révisions en une seule session diminue l'activité cérébrale dans une région donnée (peut-être par effet d'habituation à l'information). Alors que l'espacement des apprentissages l'augmente car elle force les circuits sollicités à travailler davantage. On dit que l'on déjoue ainsi « la courbe de l'oubli » *(voir l'infographie ci-contre)*. Élabo- ▸

SHUTTERSROCK

PRATIQUE

Cinq astuces pour bien mémoriser

▸ **LE REGROUPEMENT** Pour retenir rapidement une série de chiffres 8, 5, 8, 4, 3, 7, 9, 2, 1, on utilise notre mémoire à court terme (dite de travail). Mais elle ne peut retenir que sept items pendant quelques minutes. L'astuce consiste donc à regrouper les chiffres (858, 47, 921).

▸ **L'ASSOCIATION SPONTANÉE** Pour mémoriser dates ou numéros à long terme, il faut les rendre concrets en les imageant, par exemple en associant à des éléments plus concrets comme mai (68), Paris (75), le Samu (15).

▸ **LA STRATÉGIE SAC (SÉLECTION, ASSOCIATION, CONNEXION)** Utile pour mémoriser des nouveaux mots selon Sébastien Martinez, champion de France de mémoire (*lire* S. et A. *n° 866*), elle consiste à créer des associations entre des mots et des images. Par exemple, pour se souvenir que la capitale des îles Marshall se trouve sur l'atoll Majuro, on peut imaginer un maréchal (Marschall), très en colère, en train de jurer tout haut (jure – haut).

▸ **LE PALAIS MENTAL OU PALAIS DE LA MÉMOIRE** Popularisée à Rome par Ciceron, l'astuce consiste à visualiser un lieu familier et à y déposer mentalement les informations à apprendre dans un certain ordre auquel on associe une image mentale frappante. Il n'y a plus ensuite qu'à s'entraîner à revisiter le lieu pour retrouver les éléments les uns après les autres.

▸ **LA MÉTHODE COALA (CONCENTRATION OBSERVATION ASSOCIATION LIEN ANCRAGE)** Selon Sébastien Martinez, elle est indiquée pour retenir le nom de nouvelles personnes. On se concentre sur le visage en laissant cours à son imagination, qui peut être rationnelle (il ressemble à l'acteur Michel Blanc…) ou loufoque (un animal, un légume…). Puis on associe le visage au nom, en suscitant toujours des images « Pierre = caillou ». Il ne reste plus qu'à créer un lien entre visage et nom. « Michel Blanc qui reçoit une pierre sur la tête en se cassant la figure » et se le répéter autant que nécessaire.

ELENA PASQUINELLI

ELENA PASQUINELLI PHILOSOPHE, MEMBRE DE LA FONDATION LA MAIN À LA PÂTE

« L'enseignement des sciences passe par l'expérimentation »

Si l'enfant est capable d'élaborer des micro-théories sur le monde qui l'entoure, il faut ensuite lui apprendre à utiliser des outils pour tester ses hypothèses.

Pour enseigner la science aux enfants il convient de les laisser explorer une situation par eux-mêmes afin qu'ils se posent des questions et élaborent des hypothèses, mais ce n'est pas suffisant. Il est nécessaire ensuite de leur apprendre l'usage d'outils rigoureux créés par l'humain pour tester celles-ci. Contrairement à ce qu'on a longtemps pensé, à la naissance l'enfant n'est pas une ardoise vierge. On pourrait même le baptiser *Homo scientificus* dès le plus jeune âge car il est déjà équipé d'un « kit de démarrage » pour la science. Dès 16-18 mois par exemple, il élabore des micro-théories sur le monde qui l'entoure : s'il voit un objet disparaître derrière un rideau, il s'attend à le trouver de l'autre côté. Et s'il n'y est pas, l'enfant est surpris car il a une conception physique selon laquelle un objet ne disparaît pas. De même pour la gravité. Si un objet flotte dans l'air, c'est qu'une main le tient, etc. Mais ce kit de démarrage comporte des biais mis en place au cours de l'évolution pour survivre en cas de danger. Par exemple si deux personnes mangent des champignons et que l'une meurt, le réflexe de survie est de ne plus en consommer car champignon égale mort. Pourtant ce n'est qu'une corrélation. Pour établir une causalité, des tests plus poussés doivent être menés. La science consiste à apprendre à corriger ces biais naturels par l'expérimentation. C'est ce que nous apprenons aux enfants grâce à la

JONATHAN BERNARD

JONATHAN BERNARD CHERCHEUR AU CRESS (UNIVERSITÉ DE PARIS/INRAE)

« Regarder la télé en mangeant nuit à l'acquisition du langage »

Un écran allumé pendant les repas est un frein aux interactions sociales nécessaires à l'enfant pour l'apprentissage de la langue.

Pour développer le langage des enfants, mieux vaut éteindre la télévision pendant les repas. Voici ce qu'a révélé notre étude menée sur 1562 enfants de la cohorte française Eden, suivis de 2003 à 2012 et publiée en 2021 dans *Scientific Reports*. Nous avons évalué le langage des enfants grâce à des questionnaires remplis par les parents pour les plus jeunes (2 ans) et par des psychologues pour les plus âgés (3 ans et 5 ans et demi). Nous avons en parallèle évalué le temps que ces enfants passaient devant les écrans (télévision, jeux vidéo, ordinateur) durant la journée et à quelle fréquence ils y étaient exposés pendant les repas. Le croisement de ces données a abouti à un résultat frappant : si le temps total d'écran ne semble avoir que peu d'incidence sur le langage, en revanche, le moment où ces écrans sont utilisés a une influence, et ce même après la prise en compte de nombreux facteurs comme les caractéristiques socio-économiques de la famille, le mode de garde, les activités etc. Les enfants qui sont exposés tous les jours à la télévision allumée pendant les repas ont un quotient intellectuel verbal inférieur de 3 à 5 points en moyenne par rapport à ceux qui n'ont jamais la télévision en marche. Cela s'explique par le fait que l'apprentissage du langage nécessite une interaction avec d'autres humains. Or le repas est un moment où se font beaucoup d'échanges verbaux — surtout chez les Français qui passent en moyenne 2 heures par

fondation La Main à la pâte. Par exemple nous étudions le cas de la tartine beurrée qui tombe par terre. Le biais naturel incite à penser que toutes les tartines tombent toujours du côté beurré. Comment étudier ce phénomène ? En faisant plusieurs essais dont on consigne les résultats dans un tableau pour en tirer une figure (courbe…) et une interprétation. Le rôle de l'enseignant ou des parents est d'allumer la première étincelle du moteur : la curiosité. Si l'enfant dit « j'ai observé quelque chose et je veux en savoir plus », c'est gagné !" ■

Propos recueillis par E. S.

jour à table. Le fait d'avoir un écran allumé diminue ces interactions. Certes, un enfant peut retenir un nouveau mot qu'il entend à la télévision, mais pour l'acquérir réellement il lui faudra en approfondir le sens grâce aux échanges avec un adulte. Les recommandations devraient donc évoluer pour inciter les parents à moins se focaliser sur le temps d'écran que sur l'usage qui en est fait. Et si l'on accorde du temps d'écran à son enfant autant le faire en co-visionnage, ce qui permet d'en discuter, d'échanger, et par là même, de favoriser de nouveau le langage." ■

Propos recueillis par E. S.

rée en 1885 par Hermann Ebbinghaus, pionnier allemand de la psychologie expérimentale, cette courbe établit la rapidité avec laquelle on oublie une information, en fonction de la fréquence et l'intervalle des répétitions.

6 Ne jamais oublier de dormir

Si l'apprentissage bénéficie de l'espacement régulier des révisions, c'est aussi parce que toutes les nuits notre cerveau est en mode « consolidation ». *« Après l'endormissement, les éléments nerveux (neurones et structures cérébrales) activés par un apprentissage donné sont spontanément réactivés, suggérant que le cerveau endormi non seulement "révise" mais "travaille sur" les informations qu'il vient d'apprendre »*, expose ainsi l'Observatoire B2V des mémoires. Ce superpouvoir du sommeil a été découvert pour la première fois en 1994 par Matt Wilson et Bruce McNaughton, de l'université de l'Arizona (États-Unis). En effectuant des enregistrements cérébraux chez la souris, ils ont observé qu'une fois l'animal endormi, son cerveau — et précisément l'hippocampe, structure impliquée dans la mémorisation — rejouait ses déplacements de la veille, selon une séquence temporelle identique.

Dix ans plus tard, l'équipe de Philippe Peigneux, de l'université de Liège (Belgique), démontrait cette même capacité chez l'humain. En effet, d'après ses travaux, les performances à un jeu vidéo s'améliorent après une nuit de sommeil et l'accroissement des scores est corrélé avec l'activation de l'hippocampe lorsque le joueur dort. Pour rappel, un dormeur enchaîne en moyenne cinq cycles de sommeil alternant différents stades : sommeil léger, sommeil lent profond et sommeil paradoxal. Le sommeil lent profond serait plus important pour la consolidation des souvenirs et des connaissances. Alors que le sommeil paradoxal serait plus utile pour les apprentissages moteurs (savoir-faire).

PLAINPICTURE / ACACIA JOHNSON

De bonnes habitudes de sommeil (ne pas se coucher trop tard même le week-end) permettent aux enfants et adolescents d'optimiser le potentiel de développement de leur cerveau et de participer à la réussite scolaire.

« Si on perturbe l'architecture des cycles de sommeil, on perturbe l'apprentissage en général », assure le neuropsychologue Francis Eustache. C'est pourquoi, ne pas assez dormir ou se coucher trop tard entraîne des perturbations de l'apprentissage chez les enfants et adolescents. Chez ces derniers, Jean-Luc Martinot, de l'unité Inserm Neuroimagerie et psychiatrie, et son équipe ont même observé en 2017 une diminution du volume de matière grise (corps cellulaires et connexions des neurones) associée à un manque de sommeil après avoir étudié le cerveau et les habitudes de sommeil de 177 élèves âgés de 14 ans. Pour les spécialistes, cette étude suggère de veiller à ce que les adolescents acquièrent de bonnes habitudes de sommeil pendant cette période de maturation de leur cerveau. *« En particulier, éviter de se coucher systématiquement trop tard pendant les week-*

DEEPOL/PLAINPICTURE

L'impact bénéfique sur le cerveau d'une activité physique se vérifie à tous les âges.

POUR EN SAVOIR PLUS

- **Apprendre ! Les talents du cerveau, le défi des machines,** Stanislas Dehaene, Odile Jacob, 380 p., 2018.
- **La magie de la concentration,** Jean-Philippe Lachaux, Odile Jacob, 2020.
- **Activer ses neurones,** Steve Masson, Odile Jacob, 2020.
- **L'école éclairée par la science,** collectif, Odile Jacob, 2021.
- **La neuroéducation, La mémoire au cœur des apprentissages,** Francis Eustache et Bérengère Guillery-Girard, Odile Jacob, 2016.
- **Du labo à l'école : science et apprentissage,** Elena Pasquinelli. Éditions Le Pommier, 2014.
- **Le site du Conseil scientifique de l'éducation nationale :** sciav.fr/896Canope
- **La fondation La Main à la Pâte** propose des défis scientifiques à faire à la maison sciav.fr/896Mainpate

ends semble important pour optimiser le potentiel de développement du cerveau et pour contribuer à la réussite scolaire», conclut Jean-Luc Martinot.

7 Bouger pour renforcer l'apprentissage

Autre règle d'or pour bien apprendre : bougez ! En mai 2021, l'équipe de Tetsuya Matsuda, du Tamagawa University Brain Science Institute (Japon), a en effet montré que les personnes physiquement actives dans l'enfance ont de meilleurs résultats aux tests cognitifs à l'âge adulte. Pour cela, elle a analysé les résultats de tests cognitifs et d'imagerie cérébrale de 214 participants âgés de 26 à 69 ans qui avaient renseigné leur niveau d'activité jusqu'à l'âge de 12 ans. Il est alors apparu, chez ceux et celles qui avaient la plus grande activité physique étant petits, de meilleurs scores à un test de contrôle comportemental (capacité à réagir de manière appropriée sous la pression du temps), ainsi qu'une épaisseur et une efficacité corticales accrues et une connectivité inter-hémisphérique renforcée. *« On pense que l'exercice physique pendant cette période optimise le développement du réseau cérébral et est lié au maintien et à la promotion de la fonction cognitive plus tard dans la vie »*, concluent les auteurs. Mais même plus tard le fait de bouger est bénéfique. Une méta-analyse en 2016, de l'université de Colombie-Britannique (Canada) qui a passé en revue 39 articles portant sur les effets sur la santé cérébrale après 50 ans de tous types d'exercices physiques, conclut qu'*« un programme mêlant activités aérobies (d'endurance) et de résistance est bénéfique pour la fonction cognitive, à condition qu'il soit d'intensité au moins modérée et réalisée en séance de 45 minutes minimum, si possible quotidiennes »*. Une explication : le muscle agirait sur les neurones en produisant des protéines appelées « myokines » qui poussent le cerveau à multiplier les facteurs de croissance.

Mais cela reste à prouver chez l'humain. En mai 2020, l'équipe de Nick Spitzer, de l'université de Californie à San Diego (États-Unis), avait identifié, dans une publication de *Nature Communications*, des modifications neurologiques clés pour l'apprentissage après un exercice physique soutenu. Plus précisément des variations de signaux chimiques entre neurones (neurotransmetteurs), apportant une amélioration de l'apprentissage des capacités motrices. Chez la souris du moins. En attendant de plus amples études, les recommandations officielles pour la santé générale demeurent : une heure par jour d'activité physique d'intensité modérée à élevée pour les enfants, 30 minutes d'activité modérée cinq fois par semaine pour un adulte ou un adolescent. ■ @ElenaSender

BENOIT DECOUT/REA

> “L'enfant doit aussi échouer à condition qu'un retour d'information lui indique la bonne voie”
>
> **Stanislas Dehaene,** professeur en psychologie cognitive au Collège de France

Bien nourrir son cerveau pour apprendre

Notre cerveau ne représente que 2 % du poids du corps mais il a un solide appétit. Dépourvu de réserves, il doit être constamment alimenté. Voici quoi mettre au menu pour le soutenir dans ses capacités d'apprentissage, de concentration et de mémoire.

Pour que ses milliards de neurones restent activables à tout instant, le cerveau a besoin d'un apport constant en glucides car il ne dispose d'aucune réserve énergétique. *« Il consomme l'équivalent d'un morceau de sucre toutes les heures. La glycémie est déterminante pour nos performances intellectuelles. Si elle fléchit un tant soit peu, notre concentration s'effrite »*, explique le Dr Jean-Marie Bourre, chercheur en neurosciences. L'apport constant de glucose est assuré par la consommation d'aliments à index glycémique bas que sont les légumineuses (pois chiches, lentilles, haricots blancs ou rouges, etc.) et les céréales complètes (riz, pâtes, orge, pain au levain). Absorbés lentement par l'organisme, ils fournissent un apport énergétique suffisant tout au long de la journée, à condition d'être consommés aux trois repas. *« Le petit déjeuner prévient le coup de pompe de 11 heures lié à une hypoglycémie responsable de plus grandes difficultés à se concentrer et à mémoriser »*, précise Jean-Marie Bourre. Au dîner, l'apport de glucides (pâtes, riz, pommes de terre) permet au cerveau d'encoder les nouvelles informations et de consolider les apprentissages de la journée. Qu'elles soient d'origine végétale (légumineuses, céréales) ou animale (produits laitiers, viande, poisson), les protéines doivent également figurer à tous les menus. Elles sont source d'acides aminés, des molécules qui permettent d'élaborer les protéines de structure constitutives des neurones, mais également des neurotransmetteurs, qui assurent la transmission de l'influx nerveux.

BERNARD MARTINEZ

Les légumineuses et céréales complètes notamment fournissent un apport énergétique nécessaire à la concentration.

Les oméga-3 pour interconnecter les neurones

Enfin, cela peut paraître étonnant, mais le cerveau est l'organe le plus gras de l'organisme après le tissu adipeux. L'apport de lipides est donc essentiel, mais pas n'importe lesquels. *« Les oméga-3, principalement l'acide docosahexaénoique (DHA), présent dans les microalgues et les poissons gras (sardine, maquereau, anchois, hareng, saumon, thon…) entrent dans la composition des phospholipides qui constituent la membrane cellulaire des neurones et sont impliqués dans la création de nouvelles cellules neuronales. Ils sont aussi essentiels pour la transmission de messages d'un neurone à l'autre qui rend l'apprentissage et la mémoire possibles »*, explique Sophie Layé directrice du laboratoire NutriNeuro de l'Inrae à Bordeaux. ■

Sylvie Boistard
@syboistard

SUPPLÉMENTATION

Ne pas oublier les vitamines

La vitamine A, présente dans les carottes, courges, épinards, le beurre, les abats, se transforme dans le foie en acide rétinoïque qui agit sur la formation des synapses, et donc sur les bonnes connexions entre les neurones. Mais avec l'âge, sa biodisponibilité diminue. C'est pourquoi une supplémentation en vitamine A aide à prévenir un déclin cognitif. La vitamine B9 ou acide folique (noix, châtaignes, pois chiches, etc.) prévient la fatigue intellectuelle. Enfin, la B1 (flocons d'avoine, germe de blé, foie de volaille, etc), impliquée dans la transmission de l'influx nerveux, préserve la mémoire et la concentration.

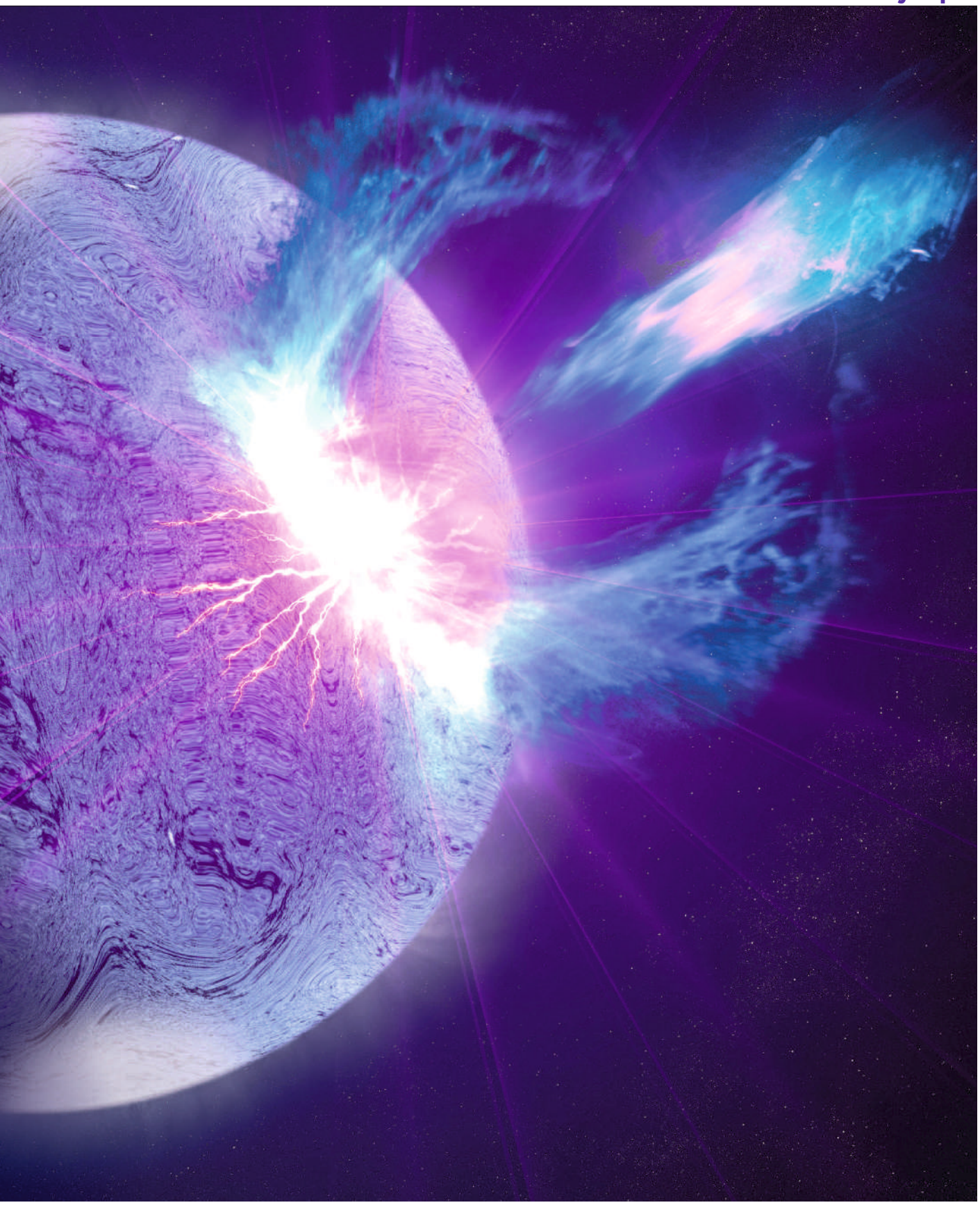
L'étoile à neutrons, astre de tous les extrêmes

De quoi est fait le cœur de ces étoiles dont des études confirment la formidable densité ? D'un simple empilement de neutrons et protons ou d'un nouvel état de la matière ? Les physiciens tentent de modéliser ces astres hors norme.

Par Fabrice Nicot @ fnicot07

Les étoiles à neutrons peuvent constituer de puissantes sources d'énergie, qui les rendent visibles à de très grandes distances, malgré un diamètre de l'ordre de la dizaine de kilomètres seulement (vue d'artiste).

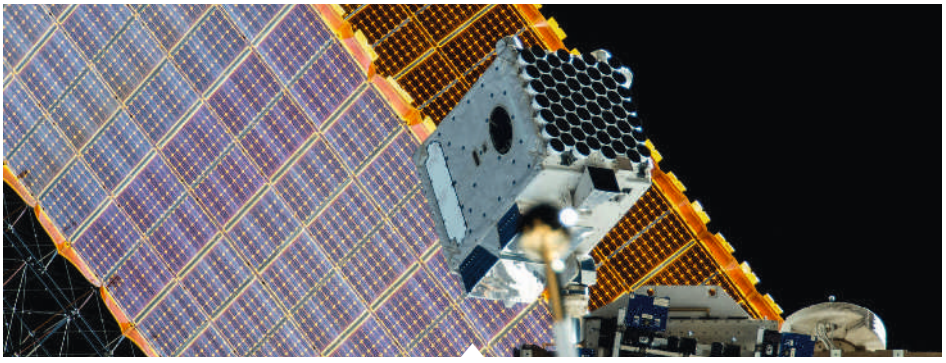
NASA'S GODDARD SPACE FLIGHT CENTER/S. WIESSINGER



Pas moins de quatre milliards de tonnes. Voilà ce que pèserait, sur Terre, l'équivalent d'une tasse à café remplie de la matière d'une étoile à neutrons. Ces astres, reliquats de l'explosion d'un soleil en bout de course *(lire l'encadré p. 45)*, sont les plus étranges du cosmos. Ils tournent sur eux-mêmes plusieurs centaines de fois par seconde. Ils renferment jusqu'à deux fois la masse du Soleil dans un rayon d'une dizaine de kilomètres. Ils sont si massifs et si denses qu'ils exercent une irrésistible attraction gravitationnelle : n'importe quoi à leur surface serait réduit à l'état de crêpe…

Mais plus que la surface, c'est le cœur des étoiles à neutrons qui intrigue les chercheurs. Ils estiment que sa densité doit atteindre quatre à cinq fois celle du noyau atomique, soit de l'ordre du million de milliards de grammes par cm^3 ! À quoi peut bien ressembler la matière ainsi comprimée ? C'est le seul exemple dans l'Univers où elle se trouve dans des conditions aussi extrêmes. Au-delà de ces densités, la matière sombre en un trou noir. Plusieurs modèles tentent de la décrire. Mais ils ont besoin de s'appuyer sur des observations. Justement, en avril, des nouvelles données ont été révélées lors d'une conférence de presse organisée par l'American Physical Society. De quoi lever un petit coin du voile sur la nature de ces astres hors du commun…

Deux équipes, l'une de l'Institut d'astronomie Anton Pannekoek à Amsterdam (Pays-Bas) et l'autre du département d'astronomie de l'université du Maryland (États-Unis), ont annoncé avoir mesuré le rayon de PSR J0740, une étoile à neutrons située à 4600 années-lumière de la Terre, dans la constellation de la Girafe. Verdict : environ 12 kilomètres.


NASA

Le télescope à rayons X Nicer de la Nasa, installé sur la Station spatiale internationale, a participé aux mesures de PSRJ0740, une étoile à neutrons de 2,5 fois la masse du Soleil située à 4600 années-lumière de la Terre.

La taille et la masse de l'astre ne seraient pas liées

Cette mesure a été établie par deux instruments différents mais complémentaires, ce qui donne d'autant plus de crédit au résultat. L'une utilise Nicer, un télescope à rayons X de la Nasa installé sur la Station spatiale internationale en 2017. L'autre provient du télescope spatial XMM Newton de l'ESA, en orbite depuis 1999. Associée à la masse de l'étoile à neutrons, 2,1 fois celle du Soleil, cette donnée confirme l'extrême densité de ce type d'astres. *« J0740 est l'étoile à neutrons la plus massive que l'on connaisse,* commente Philippe Landry, physicien à l'université de Californie, à Fullerton (États-Unis), et coauteur d'un article sur l'impact de ces nouvelles mesures. *Elle n'est pas loin de la limite théorique, au-delà de laquelle l'étoile devrait s'effondrer en trou noir. Si la matière adopte un état particulier à haute densité, J0740 est un endroit parfait pour l'étudier.* »

Ce résultat était attendu avec d'autant plus d'impatience qu'en 2019, Nicer avait déjà mesuré le rayon d'une autre étoile, J0030, plus légère : 1,4 masse solaire. La valeur était d'environ 12 km, autrement dit comme J0740, aux incertitudes de mesures près. La taille de l'étoile varierait donc peu en fonction de la masse ! Ce qui permet aux théoriciens de commencer à faire le tri entre leurs modèles. *« Il y en a deux grands types,* détaille Philippe Landry. *Soit le cœur de l'étoile est formé uniquement de neutrons, avec quelques protons, littéralement collés les uns contre les autres. C'est le modèle dit hadronique, car protons et neutrons appartiennent à la famille des hadrons. Soit, on imagine qu'à partir d'une certaine densité, la matière classique finit par se transformer*

SHOVIT BHAR/CSUF

« Si la matière adopte un état particulier à haute densité, l'étoile J0740 est un endroit parfait pour l'étudier »

Philippe Landry, physicien à l'université de Californie, à Fullerton (États-Unis)

en une matière exotique, avec l'apparition de particules qui n'existent pas sur Terre. Cela correspond à ce que l'on nomme une transition de phase. »

Le siège d'une lutte entre deux forces

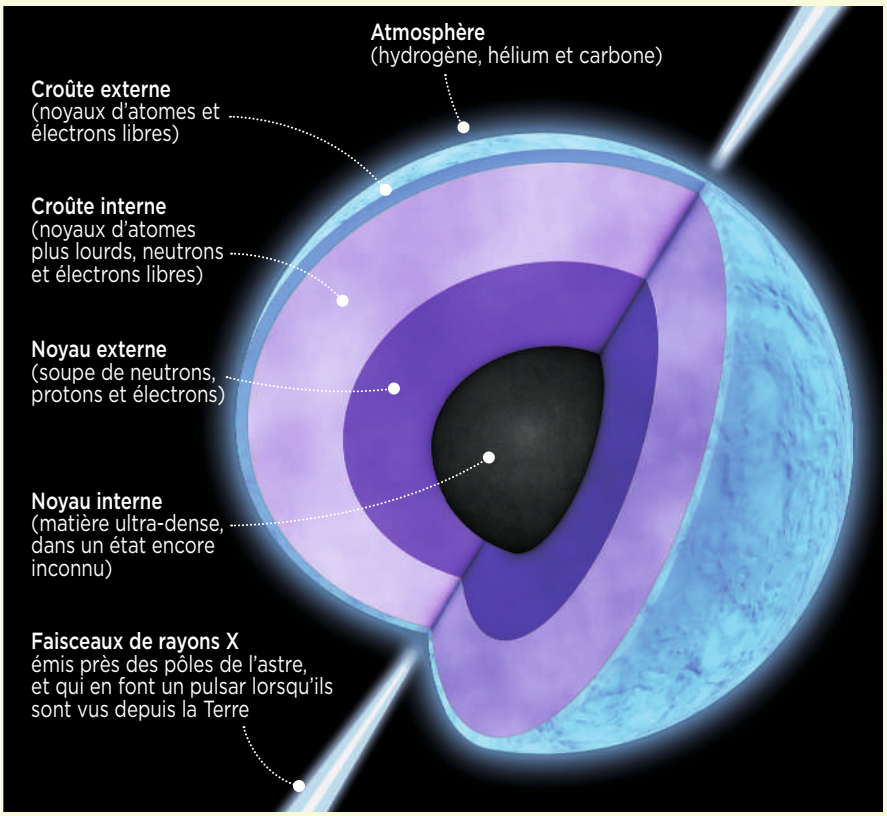
Cette transition entraînerait une conséquence directe sur la taille de l'astre. En effet, comme toutes les étoiles, l'étoile à neutrons est le siège d'une lutte entre deux forces. La force gravitationnelle qui tend à la faire s'effondrer sur elle-même, et sa pression interne qui s'oppose à cet effondrement. Dans le Soleil, cette pression est exercée par les photons, les particules de lumière produites par la fusion d'atomes légers. Dans les étoiles à neutrons, où ces réactions sont éteintes, cette pression vient des forces nucléaires qui s'exercent entre les neutrons. « *Imaginons qu'il existe une transition de phase, et qu'à partir d'une certaine densité, les neutrons se transforment en de nouvelles particules. L'énergie qui servait à résister à la gravitation se retrouve en partie consommée par la fabrication de nouvelles particules. Elle perd en efficacité pour résister à la gravitation. Le rayon devrait donc diminuer avec la masse. Or, ce n'est pas ce que nous observons* », constate Philippe Landry.

Faut-il donc abandonner le modèle exotique, et se contenter du modèle hadronique, un simple empilage de neutrons et de quelques protons ? Certains physiciens théoriciens ne peuvent s'y résoudre, à l'image de Jérôme Margueron, de l'Institut de physique des deux infinis de Lyon, qui travaille à modéliser l'état de la matière dans les étoiles à neutrons. « *Les données ont l'air de nous dire qu'il ne se passe rien de particulier au cœur des étoiles à* ▶

FORMATION

Portrait-robot d'une étoile à neutrons

Une étoile à neutrons est tout ce qu'il reste d'une étoile massive qui a brûlé tout son carburant. Sous l'effet de son propre poids, elle s'effondre sur elle-même puis explose en supernova. Lorsque les gaz issus de l'explosion se dissipent, il ne reste que le cœur de l'ancienne étoile, d'une densité extrême. L'énergie qu'elle renferme est telle que les électrons réagissent avec les protons pour former des neutrons, qui deviennent ainsi ultramajoritaires, d'où le nom donné à l'astre imaginé par le physicien Lev Landau dès la découverte du neutron par James Chadwick, en 1932. Ce cœur tourne sur lui-même à plusieurs centaines de tours par seconde. Juste après sa formation, l'étoile à neutrons s'accompagne d'un puissant champ magnétique. Lorsqu'il dépasse le gigatesla (10^9 teslas, à comparer avec celui de la Terre, 10^{-5} T), on parle alors de magnétoile. Il diminue ensuite avec le temps. Ce champ jaillit de part et d'autre de l'étoile, selon un axe écarté de l'axe de rotation. Il s'accompagne d'une émission d'ondes radio, de rayons X, ou de rayons gamma qui éclairent le cosmos comme le pinceau d'un phare. Sur Terre, ils apparaissent comme des pulses aussi brefs que réguliers. D'où le nom de « pulsar » associé à ces étoiles à neutrons. Avec le temps, l'étoile à neutrons finit par ne plus émettre. Elle devient alors invisible. Seules 2500 étoiles à neutrons ont été observées dans notre galaxie. Mais elles sont sans doute bien plus nombreuses, plusieurs centaines de milliards, la plupart éteintes, ou bien ne pointant pas leur faisceau vers nous.



BRUNO BOURGEOIS

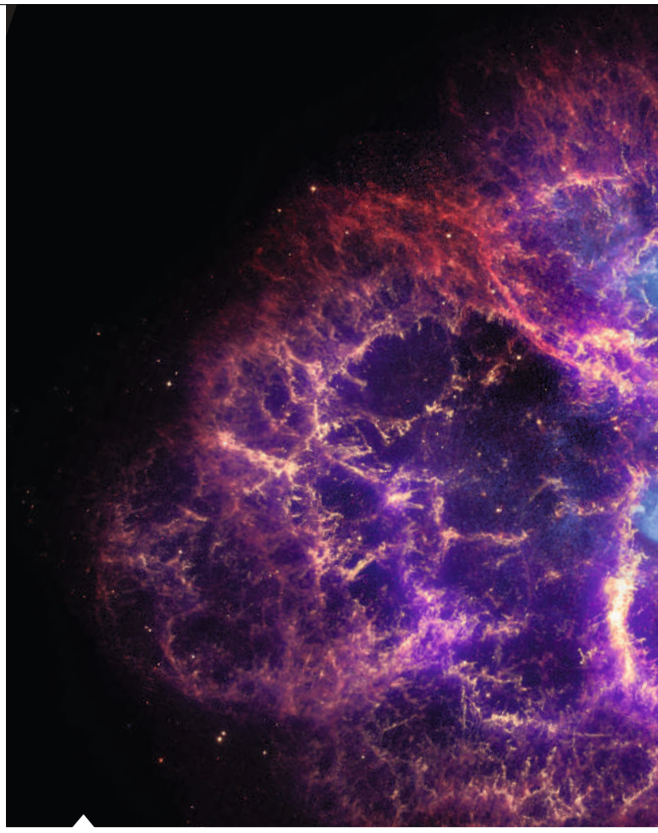
neutrons. Mais c'est probablement faux car on atteint des densités où il semble impossible qu'il n'y ait pas un nouvel état de la matière. » Et de fait, le modèle exotique a de la ressource… D'autant qu'il y en a plusieurs !

Le premier envisage ainsi qu'au-delà d'une certaine densité, des particules étranges, des hypérons, se forment au milieu des protons. Il s'agit d'hadrons, comme les neutrons et les protons, mais alors que ces derniers sont formés de triplés de quarks « up » (u) et « down » (d), les hypérons troquent l'un au moins de ces quarks pour un quark « strange » (s). Les quarks (s) ont besoin de beaucoup d'énergie pour apparaître. Sur Terre, il faut organiser de puissantes collisions comme c'est le cas au LHC, le collisionneur du Cern à Genève, pour les faire jaillir.

C'est ainsi que des hypérons ont pu être observés, et cela dès les années 1950, dans les ancêtres des collisionneurs actuels. Selon les différentes configurations de quarks (uus), (uds), etc., on en recense de quatre types : lambda, sigma, xi et oméga. Leur durée de vie est extrêmement courte, de l'ordre de 10^{-10} seconde, mais dans une étoile à neutrons, où l'énergie ne manque pas (la température peut atteindre 100 milliards de degrés juste après sa formation), ils seraient produits en continu. *« En imaginant qu'au-delà d'une certaine densité, les hypérons se multiplient, on s'attendrait à un rayon de moins de 11 kilomètres pour une étoile d'environ 2 masses solaires,* estime Jérôme Margueron. *Ce qui ne correspond pas aux observations. Mais cela ne condamne pas ce modèle pour autant. Car tout dépend des propriétés des hypérons. Imaginons qu'ils se repoussent par exemple. Dans ce cas, cela expliquerait pourquoi le rayon ne change pas lorsqu'ils apparaissent. Hélas ! du fait de leur faible durée de vie, nous savons très peu de chose sur eux.* » La survie de ce modèle dépendra donc d'une meilleure compréhension des interactions entre hypérons, grâce aux expériences menées au Cern, mais aussi au Japon et en Allemagne où des études sur les propriétés des hypérons sont en cours ou planifiées grâce aux accélérateurs J-PARC et FAIR.

Le scénario d'une vaste mer de quarks

Un autre scénario imagine un cœur constitué d'une vaste mer de quarks. *« C'est l'hypothèse dite des quarks déconfinés,* détaille Jérôme Margueron. *En temps normal, les trois quarks qui forment le neutron ne peuvent pas s'en échapper. Ils sont liés par une colle puissante, l'interaction forte. Une interaction qui se renforce si les quarks s'éloignent les uns des autres. On peut imaginer que pour une densité d'environ 3 fois celle du noyau atomique, les protons et les neutrons sont brisés, et les quarks libérés. Ils formeraient alors une sorte de liquide.* » Cela signifie qu'une propriété de l'interaction forte, où la force se renforce avec la distance, serait brisée, ce qui n'a jamais été observé. Ce modèle prévoit également une réduction du rayon, et se montre donc en contradiction avec les observations… pour l'instant !



La nébuleuse du Crabe abrite en son centre une étoile à neutrons (ici, le point bleu au centre de l'image). Cette vue combine les données de trois observatoires, (rayons X, images optiques et données infrarouges).

Car là encore, il y aurait une variante de ce modèle, connue sous le nom de « matière quarkyonique », toujours dans la course. C'est l'hypothèse la plus récente, développée en 2019 par les physiciens Larry McLerran et Sanjay Reddy, de l'université de Washington à Seattle (États-Unis). Jérôme Margueron a travaillé à l'adapter aux spécificités des étoiles à neutrons. *« Nous sommes dans l'hypothèse de la formation d'une mer de quarks, mais l'originalité de cette approche est de ne pas considérer qu'il existe une transition, où toute la matière ordinaire se changerait en quarks. Les deux états coexisteraient.* » Un peu comme en physique clas-

JÉRÔME MARGUERON

« On atteint des densités où il semble impossible qu'il n'y ait pas un nouvel état de la matière »

Jérôme Margueron,
chercheur à l'Institut de physique des deux infinis de Lyon

NASA/CXC/SAO/F.SEWARD; OPTICAL: NASA/ESA/ASU/J.HESTER & A.LOLL; INFRARED: NASA/JPL-CALTECH/UNIV.MINN./R.GEHRZ

MÉTHODE

Comment mesurer le rayon d'une étoile à neutrons ?

La surface des étoiles à neutrons est percée de plusieurs points chauds, puissants émetteurs de rayons X. Lorsqu'un faisceau de ceux-ci pointe vers la Terre, il est capté par les télescopes Nicer ou XMM Newton. La fréquence de passage du faisceau indique la fréquence de rotation de l'étoile. Pour J0740, elle est de 346 tours par seconde. Mais pour mesurer le rayon, il faut une indication supplémentaire. Elle est donnée par l'effet Doppler. Lorsque le faisceau arrive vers nous, sa fréquence est modifiée vers le bleu. Lorsqu'il s'éloigne, elle est décalée vers le rouge. Plus la vitesse de rotation du faisceau est grande, et plus ces décalages sont importants. Avec la fréquence de rotation, l'effet Doppler permet de calculer la vitesse à laquelle le point chaud parcourt le périmètre de l'étoile. Le diamètre se déduit de cette vitesse, le périmètre étant égal au produit du diamètre par pi.

sique, lorsque de l'eau bout à gros bouillons dans une casserole l'état gazeux coexiste avec l'état liquide. Ce modèle quarkyonique s'inspire d'autres états étranges de la matière, issus de la physique quantique : la superfluidité et la supraconductivité. Dans la superfluidité par exemple, l'hélium liquide à très basse température est totalement dépourvu de viscosité. « *Mais seules les particules qui ont atteint le niveau d'énergie dit de Fermi sont superfluides* rappelle Jérôme Margueron. *Ce sont uniquement elles qui donnent à la matière cette propriété de superfluidité.* »
Dans le noyau de l'étoile à neutrons, il y aurait ainsi une matière composée uniquement de quarks, et qui de temps à autre formerait des condensats de trois quarks, des protons et des neutrons, avant de se redissoudre. « *Nous aurions un mélange dynamique, l'étoile à neutrons étant une superposition quantique de deux états intriqués, des quarks déconfinés et des nucléons (protons et neutrons)* », conclut le chercheur. L'intérêt de ce modèle, c'est qu'il est cette fois compatible avec les mesures. Il prévoit qu'à haute densité, la matière serait plus répulsive qu'à faible densité. Donc le rayon pourrait stagner, voire augmenter légèrement avec la masse, contrairement aux autres hypothèses.

L'astronomie gravitationnelle à la rescousse

Pour faire le tri parmi les modèles, il faudra d'autres mesures encore plus précises de rayons d'étoiles à neutrons, si possible de masses différentes, afin d'étudier l'évolution du rayon en fonction de la masse. Des données clés pourraient venir de l'astronomie gravitationnelle, selon Philippe Landry, impliqué dans l'observatoire d'ondes gravitationnelles Ligo aux États-Unis. « *Dans un an, une nouvelle campagne d'observation va commencer avec Ligo et son homologue européen Virgo. Nous espérons observer des collisions entre étoiles à neutrons. Juste avant le choc, les étoiles sont déformées par de puissants effets de marée, dus à la force gravitationnelle, ce qui permet de faire des mesures précises du rayon.* »
Depuis la première détection d'ondes gravitationnelles en 2017, deux collisions entre étoiles à neutrons ont été observées, ce qui permet d'être optimiste. D'autant que les détecteurs auront une sensibilité renforcée lors de leur remise en route, courant 2022. De son côté, le télescope à rayons X Nicer va continuer ses observations depuis l'ISS… Les deux grandes branches de l'astronomie ne seront pas de trop pour arracher aux étoiles à neutrons, le secret de leur cœur impénétrable. ■

L'armée des robots soldats est en marche

Des projets de plus en plus élaborés d'armes autonomes se multiplient partout dans le monde. Les enjeux : être plus efficace sur le terrain, assister les soldats et, surtout, limiter l'exposition des troupes.

L'histoire a fait le tour des médias en mars dernier. Dans la Libye en proie à la guerre civile, des drones autonomes armés Kargu-2, des quadricoptères de conception turque, auraient attaqué un convoi des forces antigouvernementales qui battait en retraite. Ce serait la première fois qu'un engin robotisé passe à l'attaque sans en avoir reçu l'ordre direct. Cité dans un rapport d'experts rédigé pour le Conseil de sécurité de l'ONU, l'accrochage remonte à mars 2020. Il n'en a pas fallu plus pour faire parler de « guerre de robots tueurs ». Pourtant, après vérification, les faits ne tiennent que sur quelques lignes parmi les 556 pages que compte le rapport. Et s'il y est bien question de *« systèmes d'armes létaux autonomes […] programmés pour attaquer des cibles, sans qu'il soit besoin d'établir une connexion des données entre l'opérateur et la munition »*, on ignore en réalité si un tir a été déclenché et *a fortiori* s'il y a eu des victimes. Le drone était bien en *« autoguidage automatique »* mais rien ne dit que l'éventuelle ouverture du feu était, elle, en mode autonome.

Si l'annonce de la première attaque de robots autonomes semble donc prématurée, elle rappelle que des armées robotisées sont en train de se constituer partout dans le monde. Depuis une vingtaine d'années, les images de frappes menées par les drones aériens américains téléguidés en Afghanistan, au Pakistan ou en Irak sont devenues familières. Mais disons-le tout de suite, les « armes autonomes » et la « guerre algorithmique » relèvent encore de la fiction. Il n'empêche que des projets de plus en plus élaborés se multiplient. Les enjeux : être plus efficace sur le terrain, traiter plus d'informations et plus vite que ne saurait le faire un humain, assister les soldats en logistique ou en reconnaissance et, surtout, limiter l'exposition des troupes.

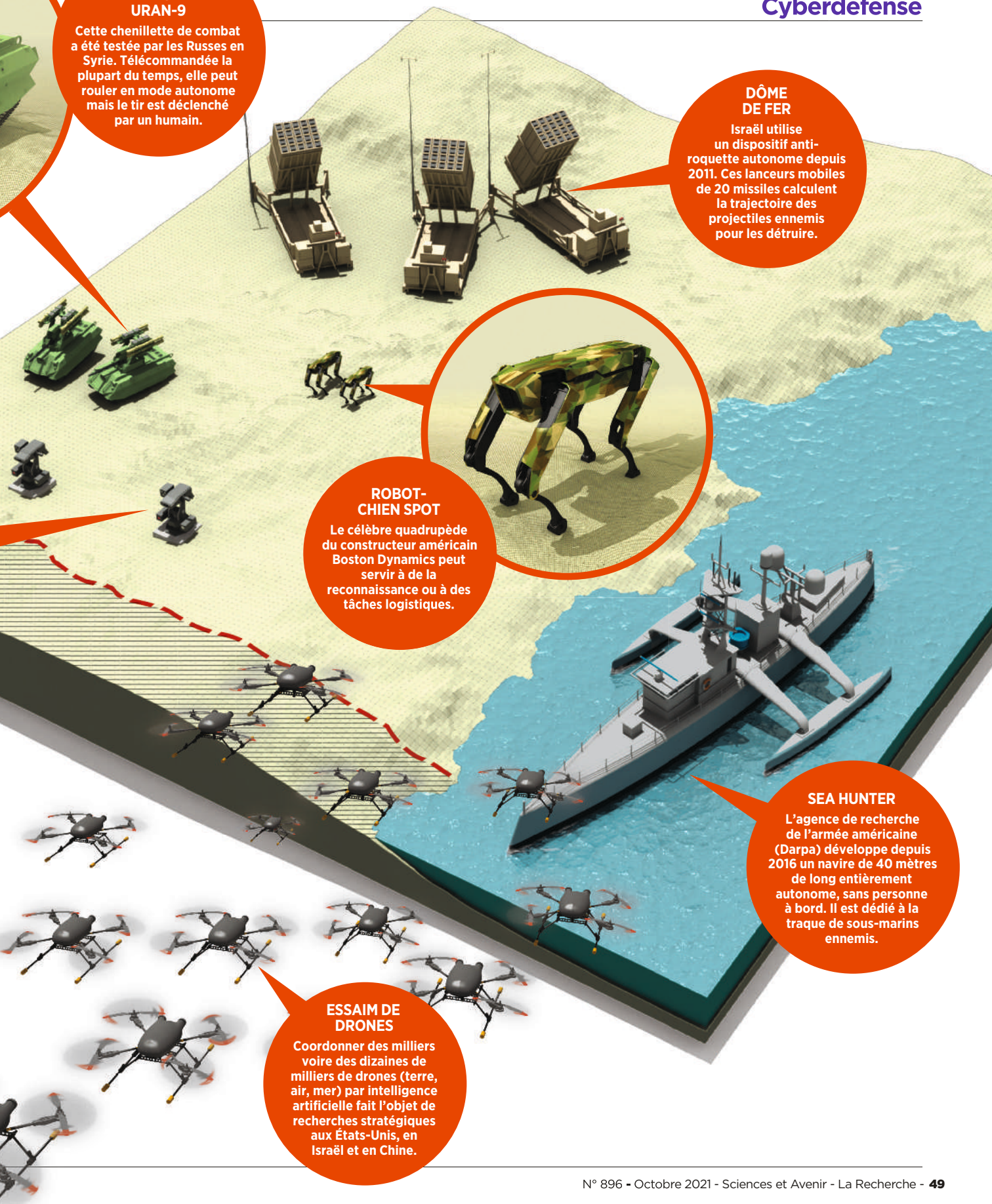
Transport de charges, sentinelles, reconnaissance…

Durant deux jours fin mars, l'École militaire spéciale de Saint-Cyr Coëtquidan (Morbihan) a ainsi mené des exercices avec le robot-chien Spot du fabricant américain Boston Dynamics (propriété aujourd'hui du coréen Hyundai), adapté par la firme française Shark Robotics, et divers robots terrestres (transport, reconnaissance). En avril, les troupes françaises au Mali ont testé Robopex, un robot-mule autonome capable de porter une charge de 750 kg. À la même époque, le ministre russe de la Défense annonçait la création d'unités expérimentales d'Uran-9. Cette chenillette anti-char peut progresser en mode autonome bien qu'elle soit la plupart du temps télécommandée. À la frontière entre les deux Corée, l'armée sud-coréenne déploie des « sentinelles » autonomes : des mitrailleuses capables de détecter par caméra thermique, à plusieurs kilomètres de distance, une présence suspecte et d'alerter un opérateur humain. La marine américaine, elle, a équipé ses navires de tourelles semi-autonomes. Elles analysent le comportement d'un objet pour déterminer s'il est hostile et s'il convient de riposter.

Si dans ces exemples, les engins robotisés assistent voire remplacent les combattants humains, d'autres développements permettent déjà d'accomplir des tâches qu'ils ne pourraient remplir seuls. Ainsi, au Proche-Orient, le « Dôme de fer » protège Israël des roquettes tirées depuis la bande de Gaza par le mouvement islamiste palestinien Hamas. Ce système automatique couplant détection radar et missile antimissile estime le point d'impact des projectiles pour choisir lesquels détruire,

ROBOT SENTINELLE SGR-A1
Déployée par les Sud-Coréens à la frontière avec la Corée du Nord, cette arme autonome, conçue par Samsung, peut détecter et suivre une cible à plusieurs kilomètres via des caméras optiques et thermiques infrarouges.

MEHDI BENYEZZAR POUR SCIENCES ET AVENIR - LA RECHERCHE



DRONE TERRESTRE URAN-9

Cette chenillette de combat a été testée par les Russes en Syrie. Télécommandée la plupart du temps, elle peut rouler en mode autonome mais le tir est déclenché par un humain.

DÔME DE FER

Israël utilise un dispositif anti-roquette autonome depuis 2011. Ces lanceurs mobiles de 20 missiles calculent la trajectoire des projectiles ennemis pour les détruire.

ROBOT-CHIEN SPOT

Le célèbre quadrupède du constructeur américain Boston Dynamics peut servir à de la reconnaissance ou à des tâches logistiques.

SEA HUNTER

L'agence de recherche de l'armée américaine (Darpa) développe depuis 2016 un navire de 40 mètres de long entièrement autonome, sans personne à bord. Il est dédié à la traque de sous-marins ennemis.

ESSAIM DE DRONES

Coordonner des milliers voire des dizaines de milliers de drones (terre, air, mer) par intelligence artificielle fait l'objet de recherches stratégiques aux États-Unis, en Israël et en Chine.

en laissant passer ceux qui ne feront pas de victimes. « *Quand l'espace aérien, terrestre ou naval est saturé, si vous n'avez pas d'intelligence artificielle (IA) ou de système automatisé, vous ne pouvez rien faire d'autre que prendre les bombes sur la tête* », résume Thierry Berthier, enseignant chercheur en mathématique à l'université de Limoges et expert en cyberdéfense. L'armée américaine travaille justement sur la notion de « super-essaims » de drones : des dizaines de milliers de machines coordonnées pour fondre sur une même cible. Impossible de commander à distance une telle opération, il faut s'en remettre à une IA. De même pour contrer l'attaque.

Et ce n'est que le début. L'agence de recherche de l'armée américaine, la Darpa, teste un navire prototype traqueur de sous-marins entièrement autonome. En Europe, le Système de combat aérien du futur (Scaf) doit combiner, d'ici à 2040, un avion de chasse avec pilote, des drones, des avions de ravitaillement, des satellites, des navires, le tout interconnecté et intégrant de l'IA grâce à un *cloud* de combat. « *Je suis très prudent sur l'utilisation de la formule intelligence artificielle,* tempère Nicolas Arpagian, directeur de la stratégie cybersécurité chez l'éditeur Trend Micro. *Elle signifie que vous confiez à un modèle mathématique une prise de décision dont l'humain n'a plus à s'occuper.* » La réalité, c'est que sur un même engin, toutes les fonctions peuvent être automatisées mais ne le sont pas forcément : déplacement (comme les voitures sans conducteur), détection, identification, ciblage et… tir. Pour l'heure, celui-ci n'est activé que pour la riposte (comme le Dôme de fer ou la tourelle antitorpille Phalanx). Pour y voir plus clair, dans la *Revue Défense nationale*, Thierry Berthier a distingué six niveaux d'autonomie *(voir ci-dessous)*. Le dernier correspondant au robot « Terminator » qui ne peut pas être repris en main. « *En milieu terrestre, cette autonomie totale n'a pas d'intérêt opérationnel,* estime cependant le chercheur. *C'est comme une mine que vous posez et oubliez. Elle peut en revanche servir en milieu sous-marin, moins dense, avec moins d'interactions à gérer, pour repérer et détruire des mines.* »

ECOLES DE SAINT-CYR COËTQUIDAN - ARMÉE DE TERRE

Spot, le robot-chien a été testé par l'armée française au cours d'exercices où il a effectué des missions de reconnaissance.

En France, la doctrine officielle est de conserver un humain dans la boucle et privilégier la commande à distance. Mais d'autres pays ne s'interdisent pas de voir au-delà : la Chine ne pose pas de limites à ses développements ; la Turquie et la Russie expérimentent des drones armés en Syrie ou en Libye, le président russe Vladimir Poutine ayant fait savoir qu'il refuserait tout texte international interdisant ou limitant les armes autonomes. « *Aux États-Unis, le débat éthique a un temps pris le dessus mais il y a un an, le ministère de la Défense a estimé que ce qui ne serait pas éthique, ce serait d'envoyer des soldats face à des unités robotisées contre lesquelles ils n'auraient aucune chance de survie* », continue Thierry Berthier.

Des drones sacrifiables en première ligne

L'enjeu actuel semble consister à envoyer des machines autonomes en première ligne. Y compris des drones sacrifiables, capables de se faire sauter sur une mine ou de se faire exploser sur une cible. C'est d'ailleurs ce que recommande un rapport du Sénat paru en juin. Un premier pas vers une guerre entre machines ? Nicolas Arpagian n'y croit pas : « *Les drones permettent de réduire l'incertitude,* estime-t-il. *On peut s'en servir pour faire du renseignement, faire sauter un pont, défendre une position mais pour prendre le contrôle d'un pays, d'un territoire, de ressources, il faut engager des gens sur le terrain.* » Si Terminator n'est qu'un fantasme, la guerre sans victimes humaines en est un aussi. ■

Arnaud Devillard @A_Devila

POUR EN SAVOIR PLUS

- **Les systèmes d'armes létales autonomes :** sciav.fr/896armesletales
- **Le rapport sénatorial « Drones dans les forces armées » :** sciav.fr/896Senat
- **Les « robots tueurs » selon le CNRS :** sciav.fr/896CNRS

FONCTIONS

Les six degrés d'autonomie d'un système armé

L0
- Un drone (terrestre, naval, aérien) **téléopéré.**

L1
- Le drone est **connecté à un soldat** et duplique ses actions. Il peut voir et viser la cible repérée par le soldat et tirer quand celui tire.

L2
- Le robot **se déplace seul, détecte des cibles** en fonction d'instructions préalables ; le tir a lieu sur décision humaine

L3
- Le robot **propose des cibles** identifiées comme hostiles ; engagement et tir sur autorisation humaine.

L4
- Le robot engage une cible et **tire sans autorisation humaine** mais il peut être repris en main avant.

L5
- Autonomie totale, **reprise en main impossible.** C'est le robot type « Terminator ».

HORS-SÉRIE

en vente en kiosque

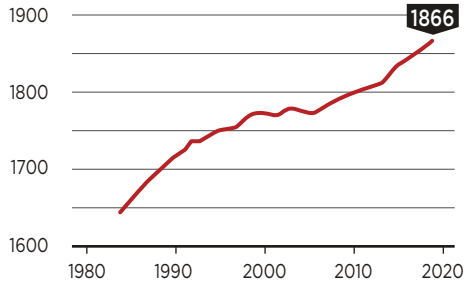
Réchauffement : le joker méthane

Lutter contre les émissions de ce gaz à effet de serre permettrait d'éviter une augmentation de 0,3°C des températures mondiales. Une opportunité à saisir grâce aux nouveaux outils satellitaires de détection des fuites.

Par Loïc Chauveau @Loic_Chauveau

Les concentrations de méthane dans l'atmosphère

(en parties par milliard : ppb, nombre de molécules de méthane par milliard de molécules d'air)



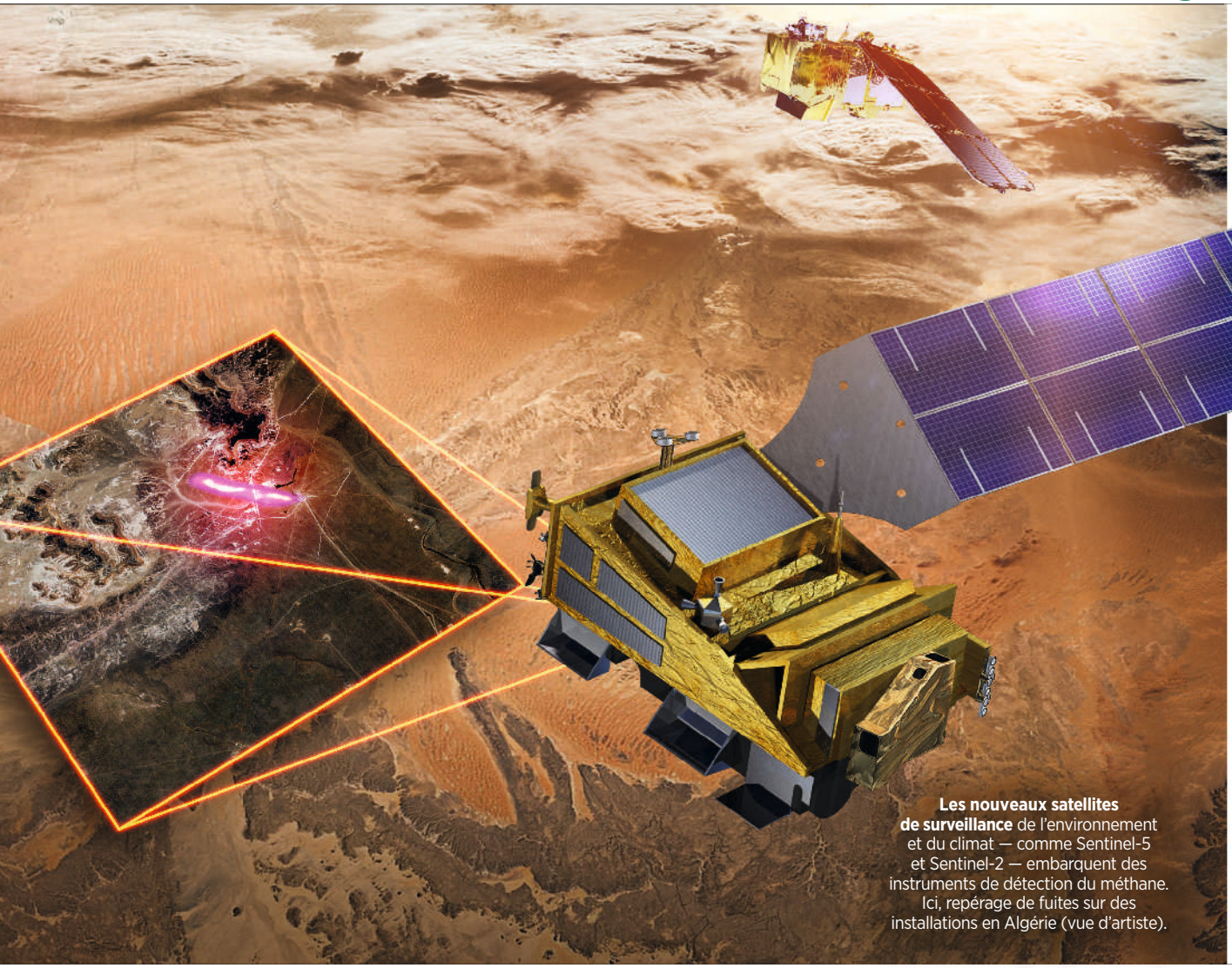
BRUNO BOURGEOIS

CONTEXTE

Les émissions mondiales de méthane d'origine humaine se sont élevées à 350 millions de tonnes en 2019. Elles ont doublé depuis 1850. Les concentrations moyennes dans l'atmosphère sont passées de 1650 parties par milliard (ppb, nombre de molécules de méthane par milliard de molécules d'air) dans les années 1980 à 1866 ppb aujourd'hui. Si rien n'est fait, les émissions vont augmenter de 15 % au cours de la décennie qui vient.

Un remède puissant, efficace et peu cher ! La lutte contre le changement climatique devrait intégrer une nouvelle arme lors de la COP26 qui s'ouvre en novembre à Glasgow (Royaume-Uni) : la diminution des émissions de méthane. Jusqu'à présent en effet, rien de sérieux n'a été entrepris pour réduire les émissions du deuxième gaz à effet de serre en volume derrière le dioxyde de carbone (CO_2). C'est que les scientifiques peinaient à établir une carte précise des émissions. Or depuis un an, ils ont mis à disposition des outils pour les détecter aussi bien autour des grandes sources comme les puits de pétrole et de gaz, que de celles plus petites telles les chaudières des habitations. « *La COP26 marquera le vrai début de la lutte contre les émissions de méthane* », prévient Alok Sharma, le président britannique de cette prochaine négociation climat.

Un véritable joker ; en effet, dans un rapport remis début mai à l'ONU, la « coalition pour un air propre et pour le climat » — un partenariat entre gouvernements, entreprises, ONG et instituts scientifiques du monde entier — assure que tous les sec-



Les nouveaux satellites de surveillance de l'environnement et du climat — comme Sentinel-5 et Sentinel-2 — embarquent des instruments de détection du méthane. Ici, repérage de fuites sur des installations en Algérie (vue d'artiste).

DIDIER FLORENTZ POUR SCIENCES ET AVENIR - LA RECHERCHE

teurs émettant du méthane disposent d'ores et déjà de solutions techniques pour éviter d'ici à 2030 le relargage de 120 millions de tonnes de méthane, soit plus d'un tiers des émissions anthropiques ! Et ce, sans efforts conséquents, sans investissements onéreux voire en dégageant parfois des profits. Avec une action plus volontariste mais sans obstacle insurmontable, l'émission d'encore 60 millions de tonnes supplémentaires pourrait être évitée. En résumé, la courbe du méthane peut facilement être infléchie de plus de 50 % en moins de dix ans. De quoi éviter une augmentation de 0,3 °C des températures mondiales. Un énorme coup de pouce pour tenir l'engagement de la communauté internationale dans l'accord de Paris à limiter la hausse à 1,5 °C par rapport au niveau pré-industriel, sachant que les températures ont déjà augmenté de… 1,1 °C.

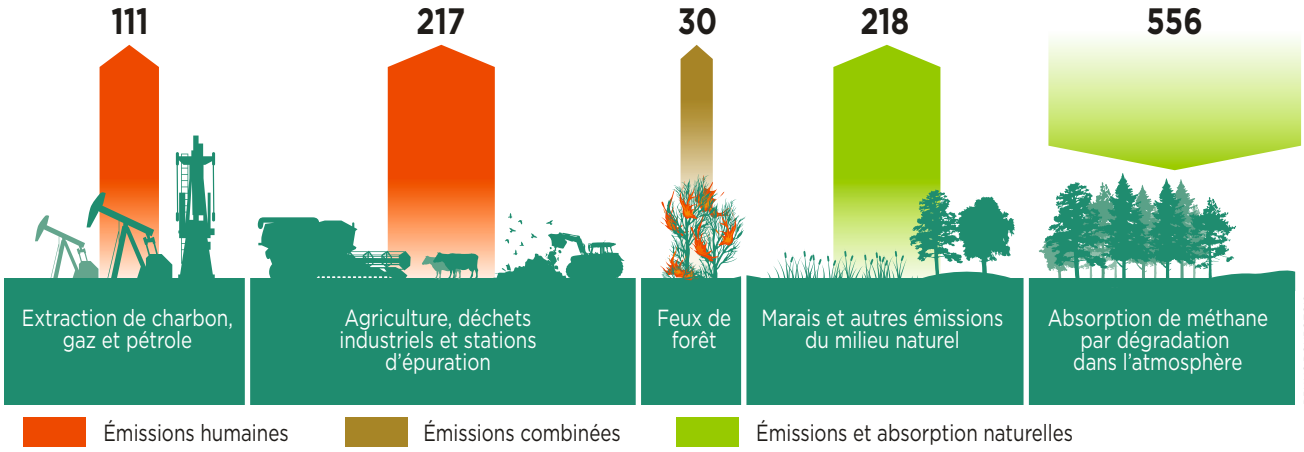
120 millions
de tonnes d'émission de méthane pourraient être évitées d'ici à 2030 grâce à des techniques déjà existantes.

Un effet aussi rapide résulte des caractéristiques même du méthane. « *Sa durée de vie dans l'atmosphère est de huit ans seulement parce qu'il est détruit naturellement par les radicaux hydroxyles OH,* détaille Jean-Daniel Paris, chercheur au Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE-CNRS/CEA) de l'université Paris-Saclay. *En revanche son pouvoir de réchauffement est 28 fois supérieur au CO_2. En réduisant ses émissions, on obtient donc très vite un résultat important.* »

Mais où traquer les émissions ? La moitié d'entre elles sont naturelles, provenant de la dégradation de la matière organique dans les marais : pas question de les assécher au vu de leur importance écologique. C'est du côté des émissions anthropiques qu'il faut agir. Celles très diffuses de l'agriculture (qui ▸

Les émissions mondiales de méthane

en millions de tonnes de méthane par an (moyenne 2008-2017)



BRUNO BOURGEOIS

comptent pour 45 % des émissions humaines) nécessiteront de très lourdes mutations économiques, sociales et techniques *(lire l'encadré ci-dessous)*. À court terme, ce sont les secteurs de l'extraction du charbon (12 % des émissions), gazière et pétrolière (23 %) et celui des déchets municipaux, industriels et les boues de station d'épuration (20 %) qui recèlent les plus grandes opportunités de réduction de ce gaz. En effet, puits, pipelines, réseaux de distribution de gaz, industries et décharges fuitent dans des proportions gigantesques que viennent de révéler les nouveaux outils de mesure.

Comment localiser précisément ces fuites ? Le méthane est un gaz insaisissable dont les teneurs s'expriment en parties par milliard quand le CO_2 se compte en parties par million. Sa détection est donc plus difficile. *« Les mesures de sécurité sont drastiques pour éviter les accidents, mais les petites fuites ne présentant pas de risques sont très difficiles à détecter et impliquent une surveillance et une maintenance très étroites alors que*

PROGRAMMES

Élevage : des moyens d'action faciles à mettre en œuvre

ERIC LAFFORGUE/GETTY IMAGES

Les rots des 120 millions de vaches éthiopiennes comptent pour 48 % des émissions totales de méthane du pays.

En remettant le 31 juillet sa contribution nationale pour la réduction des gaz à effet de serre, l'Éthiopie a fait sensation. Le pays ambitionne de diminuer de 68,8 % ses émissions de gaz à effet de serre (qui comptent pour 0,04 % des émissions mondiales) d'ici à 2030 en réduisant fortement son cheptel bovin de 120 millions de têtes au profit des poulets, dont la production devra passer de 30 000 à 80 000 tonnes par an. Les vaches — qui émettent du méthane par leurs rots — représentent en effet 48 % des émissions du pays. Une autre façon de réduire les émissions de méthane des bovins ailleurs dans le monde est de jouer sur leur alimentation, notamment par l'adjonction de lin dans leur nourriture et une plus grande proportion d'herbe à la place du maïs et du soja. L'agriculture peut également agir par un meilleur usage des fumiers comme enrichissement des sols en substitution des engrais chimiques et en développant la méthanisation des déchets agricoles qui consiste à mettre les lisiers dans des digesteurs pour produire du gaz. En Europe, la politique agricole commune (PAC) 2023-2027 comporte ainsi un volet d'incitation aux actions de réduction des émissions de méthane et de production de biogaz.

les réseaux font des milliers de kilomètres », concède Pascale Guillo-Lohan, déléguée réseaux en charge de la trajectoire bas carbone à GRTgaz, le gestionnaire du réseau de transport du gaz naturel en France. Les instruments peinent donc à mesurer très précisément ces fuites. Or, elles peuvent atteindre des centaines de tonnes en très peu de temps. Des fuites ont ainsi atteint des débits de plus de 300 tonnes par heure sur de grands sites d'extraction de gaz de schiste comme aux États-Unis, en Arabie saoudite ou en Russie.

Heureusement, la détection globale permet aujourd'hui de pallier l'approche très défaillante de mesures de terrain. Les nouveaux satellites de surveillance de l'environnement et du climat embarquent des instruments de détection du méthane. C'est le cas de Sentinel-5 lancé en octobre 2017 dans le cadre du programme européen Copernicus. « *Ce satellite est capable de couvrir la surface de la Terre en une journée, mais il a un défaut : sa précision n'est que de 7 kilomètres, ce qui ne permet pas de pouvoir détecter une fuite sur une installation,* explique Antoine Halff, fondateur de la société française Kayrros spécialisée dans la fourniture de données aux compagnies mondiales de l'énergie et qui devrait être l'une des vedettes de la COP26. *Mais en mariant les mesures de Sentinel-5 à celles de Sentinel-2, qui sont d'une précision de 20 mètres mais qui ne couvrent la surface terrestre que tous les cinq jours, nous avons obtenu une résolution de 30 mètres.* »

J.C. MOSCHETTI/REA

L'entretien et la maintenance sont des opérations cruciales sur les gazoducs qui peuvent couvrir plusieurs milliers de kilomètres (ici un chantier en Bretagne).

Au Canada, GHGSat revendique une précision similaire. Et les premiers résultats montrent que les émissions déclarées par les industriels étaient jusqu'à dix fois inférieures à la réalité. « *C'est aussi ce que nous avons constaté quand nous avons fait le tour de la péninsule arabique avec un bateau équipé d'instruments de mesure* », abonde Jean-Daniel Paris.

Maintenant que les moyens de détection existent, les industriels ne peuvent donc plus remettre au lendemain les nécessaires actions de réduction de leurs émissions. Les principales compagnies sont réunies depuis 2014 au sein du Partenariat du pétrole et du gaz pour le méthane, fondé par le Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE). Les engagements y sont volontaires et les résultats ne sont pas diffusés. « *Nous réclamons de notre côté cette transparence,* lance Pascale Guillot-Lohan. *Notre premier programme a permis de réduire les émissions de GRTgaz de 30 millions de m³ en 2016 à 10 millions en 2020, soit 0,02 % du volume de gaz transporté.* » Parmi les initiatives mises en œuvre : l'utilisation de « camions aspirateurs », qui vident les tronçons de pipelines gaziers devant être inspectés ou remplacés. « *Auparavant, nous relâchions le gaz dans l'atmosphère. Aujourd'hui nous le récupérons et nous le réinjectons dans le réseau* », poursuit Pascale Guillot-Lohan.

Les exploitants de gaz vont devoir stopper les fuites

Désormais sous surveillance, les exploitants de gaz naturel et du pétrole ne pourront plus tergiverser. Il leur faudra augmenter leurs actions pour stopper les fuites autour des puits, interdire les opérations de torchage (brûlage à la sortie des puits de pétrole du gaz en excès) et de dégazage des installations en maintenance. De même, les centres d'enfouissement devront être équipés de systèmes de récupération de biogaz (ce qui existe déjà en France et en Europe).

C'est dans ce contexte qu'Alok Sharma va mettre le méthane sur le sommet de la pile des nombreux sujets que la COP26 va devoir régler. En rappelant sans doute aussi que l'action la plus puissante est dans les mains de chacun : réduire la consommation de gaz naturel et de pétrole et le volume de ses déchets. L'opportunité de ce joker méthane doit être jouée maintenant. ■

NIA SCHUMACHER

« Nous avons constaté des émissions 10 fois supérieures à celles déclarées »

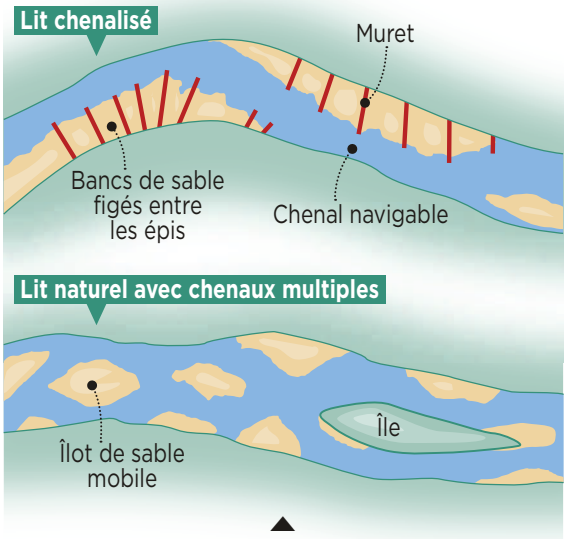
Jean-Daniel Paris, chercheur au Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement de l'université Paris-Saclay

La Loire se libère de son corset d'épis

Un vaste chantier de démolition des murets qui rendaient le cours d'eau navigable au XIXe siècle va permettre au plus long fleuve de France de retrouver son cours naturel. La biodiversité du milieu fluvial en sera renforcée.

La Loire retrouve une partie de sa liberté ! Depuis le 1er septembre, bulldozers et pelleteuses sont en train de supprimer 38 « épis de navigation » : des murets de pierre placés en travers du cours du fleuve depuis 1850. Pour les voir, il faut se promener entre le pont suspendu de Montjean-sur-Loire (Maine-et-Loire) et la pointe ouest de l'île de Chalonnes. À la fin de l'été, pendant la période d'étiage — quand le débit du cours d'eau est au plus bas —, les immenses bancs de sable et de sédiments ourlent les rives et enserrent le lit central où le courant reste vif. C'est à cette époque que les épis sont à sec. Et peuvent être détruits.

La Loire n'est pas du tout « le dernier fleuve sauvage d'Europe ». Il a été endigué dès le XVIIIe siècle et calibré au XIXe siècle pour se soumettre aux besoins de la population. Les digues étaient destinées à lutter contre les inondations et les épis à le rendre navigable. Pour y faire passer bateaux et péniches, les ingénieurs avaient imaginé construire en travers du cours ces murets destinés à détourner le courant des méandres et « bras » d'un cours divagant auparavant librement dans son large lit majeur (le pont de Montjean fait près de 500 m de long). Ils devaient ainsi assurer que les eaux emplissent en permanence le centre du fleuve. Plus de 750 épis ont été construits entre les Ponts-de-Cé et Nantes. Au début du XXe siècle, les bateaux pouvaient remonter le cours jusqu'à 150 kilomètres de l'estuaire.



BRUNO BOURGEOIS

Les travaux du XIXe siècle ont permis de stopper la formation d'îlots mobiles de sédiments pour créer un chenal navigable.

« *Ces ouvrages ont eu trois conséquences,* résume Séverine Gagnol, cheffe de l'unité territoriale Loire Aval chez Voies navigables de France (VNF), maître d'ouvrage du projet. *Tout d'abord le lit s'est creusé du fait de l'accélération du courant et du blocage du sable et des sédiments par les épis. Ensuite, les bras latéraux se sont asséchés. Enfin, les marées ont pu remonter plus loin dans le fleuve, salinisant des milieux d'eau douce.* »

À Nantes, le fond du fleuve s'est affaissé de 4 mètres. Les bras latéraux quant à eux ne sont plus en eau que de 30 à 50 % du temps. Ces périodes d'assèchement s'allongent, si bien que le milieu aquatique disparaît. « *Les bancs sont colonisés par les saules, s'enfrichent et se referment, des plantes invasives comme la jussie les colonisent* », énumère Séverine Gagnol. Et cette disparition de zones latérales humides nécessaires pour préserver la biodiversité du milieu fluvial va s'accélérer avec le changement climatique. Déjà, les observateurs locaux constatent que le nombre d'inondations diminue du fait de chutes de neige moindres sur le Massif central où la Loire prend sa source. Dans quelques décennies, les bras ne devraient plus être inondés que de 10 à 30 % du temps, prédisent les modélisateurs.

Par ailleurs, les « épis » ont perdu de leur utilité aux cours du XXe siècle quand le chemin de fer et la route ont supplanté le transport fluvial. Les projets de

SHUTTERSTOCK

Les épis, visibles quand le cours d'eau est bas, servaient à détourner le courant vers le centre du fleuve (ici entre Ancenis et Varades en Loire-Atlantique).

domestication du fleuve portés à partir des années 1970 ont été en outre abandonnés devant les protestations des défenseurs de l'environnement. Enfin, l'extraction de sable dans la Loire, massive lors de la période de reconstruction d'après la Seconde Guerre mondiale, a été interdite au début des années 1990. Elle déséquilibrait des fonds du lit central.

Rassurer les riverains sur les risques d'inondations

C'est dans ce contexte qu'en 1994, l'État a décidé d'un plan global d'aménagement baptisé « Loire grandeur nature » visant à concilier sécurité des personnes et des biens, protection de l'environnement et développement économique. La réflexion sur le recalibrage du fleuve a duré vingt-cinq ans. 6,5 millions d'euros ont été consacrés aux travaux de recherche sur un budget total de 42 millions d'euros.

Car on ne touche pas un écoulement massif d'eau sans prendre d'immenses précautions. Des expériences limitées à de petits tronçons de la Loire sont venues à l'appui d'études hydrologiques sur maquettes au 1/100e dans les laboratoires du Centre d'analyse comportementale des ouvrages hydrauliques (Cacoh, dépendant de CNR, le concessionnaire de la production hydroélectrique sur le Rhône). *« La principale inquiétude des riverains, ce sont les inondations,* rappelle Xavier Métay, de l'association France Nature environnement Pays de la Loire. *Relever le lit du fleuve fait craindre que l'eau s'étale plus loin sur les rives.* » En enlevant les épis, en effet, les sédiments vont rejoindre le cours central et reformer les îlots mobiles qui existaient avant les aménagements. Le fleuve perdra en profondeur et son courant charriant de nouveau des sédiments à la vitesse de 1 à 4 kilomètres par an se ralentira. Conséquence : le fond devrait remonter d'un mètre, mais pas plus, assurent les ingénieurs du Cacoh.

« Le fleuve va réoccuper ses bras latéraux, se réjouit Xavier Métay. *Des zones humides vont de nouveau remplir leur rôle écologique auprès d'espèces de poissons comme le brochet, la lamproie, l'anguille.* » Certes une reconstitution d'un fleuve « sauvage » d'avant l'ère industrielle est une utopie puisque le fleuve reste endigué, mais les travaux vont assurer un retour à un fonctionnement plus « normal » lorsqu'ils toucheront à leur fin, à l'horizon 2026. ■

Loïc Chauveau
@Loic_Chauveau

Ce que révèlent nos groupes sanguins

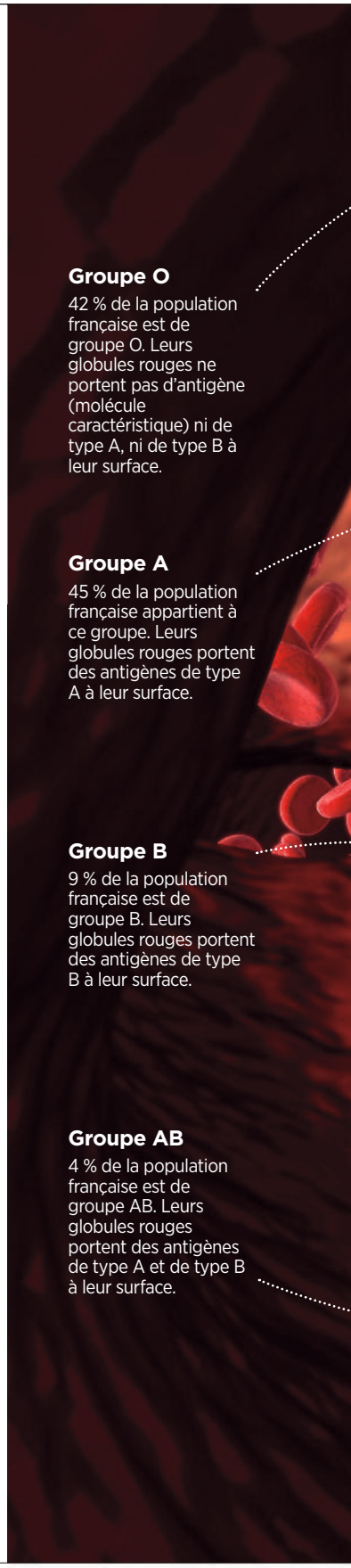
Que se cache-t-il derrière ces trois lettres, A, B et O, les groupes sanguins les plus connus ? Pourquoi sont-ils si inégalement répartis dans le monde ? Mieux les étudier permet de sécuriser les transfusions et d'améliorer le traitement des maladies du sang.

Par Camille Gaubert @CamilleGaubertb

« *Les groupes sanguins O et rhésus - pourraient être associés à un risque d'infection légèrement inférieur par le Sras-Cov-2 et à des symptômes moins graves de Covid-19.* » Cette conclusion d'une publication de médecins américains, parue au printemps dans la revue *Annals of Internal Medicine*, a remis sur le devant de la scène une caractéristique propre à chacun, invisible et finalement insignifiante tant que l'on n'est pas confronté à la nécessité d'une transfusion : le groupe sanguin.

Pour la plupart d'entre nous, celui-ci se résume à trois lettres, A, B ou O. De quoi s'agit-il ? Elles font référence à des molécules qui recouvrent nos globules rouges. Mais pas seulement : on les retrouve aussi sur les cellules de multiples organes comme celles du cœur ou des intestins. Telles des pelotes d'épingles, elles sont hérissées de sucres et de protéines que l'on appelle des antigènes. Mais il y a bien plus de trois « groupes sanguins » : si le système ABO est le premier à avoir été décrit en 1901 par le biologiste et médecin autrichien Karl Landsteiner, on en compte aujourd'hui en réalité 43 ! Et les scientifiques ne cessent d'en découvrir de nouveaux. Le dernier en date, décrit en 2020 par une équipe française codirigée par le Dr Thierry Peyrard, chef de service au Centre

Si le système ABO est le premier à avoir été décrit en 1901, on compte aujourd'hui 43 types de groupes sanguins. Et les scientifiques ne cessent d'en découvrir de nouveaux !



Groupe O
42 % de la population française est de groupe O. Leurs globules rouges ne portent pas d'antigène (molécule caractéristique) ni de type A, ni de type B à leur surface.

Groupe A
45 % de la population française appartient à ce groupe. Leurs globules rouges portent des antigènes de type A à leur surface.

Groupe B
9 % de la population française est de groupe B. Leurs globules rouges portent des antigènes de type B à leur surface.

Groupe AB
4 % de la population française est de groupe AB. Leurs globules rouges portent des antigènes de type A et de type B à leur surface.

BRUNO BOURGEOIS – SPL/SUCRÉ DALÉ

national de référence pour les groupes sanguins (CNRGS), s'appelle le système ABCC1.

Mais revenons au plus connu : le système de groupes sanguins érythrocytaires (c'est-à-dire qui concernent les globules rouges) ABO. Il existe quatre variantes majeures à ce système : un individu peut posséder le sucre A, le B, les deux — c'est le groupe AB — ou aucun — le groupe O. Les personnes qui connaissent leur groupe A, B ou O citent généralement le signe « + » ou « - » qui l'accompagne : c'est le système Rh, anciennement rhésus. Le système Rh compte 55 antigènes, dont l'antigène D, présent chez 85 % de la population : ceux qui possèdent D sont Rh positif, et les autres sont Rh négatif.

Un lien déjà observé dans différentes maladies

En fonction des régions du monde, la prévalence des groupes sanguins peut considérablement différer. En France, nous sommes environ 45 % de A, 42 % de O, 9 % de B et 4 % de AB. La situation est totalement différente chez les Indiens d'Amérique du Sud, où l'on ne trouve que des O+ ! Comment expliquer de tels contrastes ? Pour Stéphane Mazières, généticien et anthropologue à la faculté de médecine de Marseille, cela pourrait signifier que l'ensemble de ces peuples descend d'une toute petite population portant essentiellement cet O+, arrivée de Sibérie il y a 20 000 à 25 000 ans. Autre exemple, en Asie, où la proportion d'individus du groupe B est la plus haute du monde : 40 % en Inde. Cette fois, l'explication serait plutôt à chercher du côté des maladies : *« le groupe B semble conférer une protection relative contre le choléra, tandis que le groupe O y est plus sensible »*, précise Stéphane Mazières.

Le lien entre groupe sanguin et protection contre une maladie tel celui observé pour le Covid-19 n'est donc pas inédit. Le groupe O semble ainsi conférer une protection relative contre le parasite *Plasmodium falciparum* responsable du paludisme, d'après Thierry Peyrard. De même, l'antigène A du système de groupe sanguin Duffy — forme rare en France, et très fréquente dans certains pays d'Afrique — protège contre le *Plasmodium vivax*, autre parasite du paludisme.

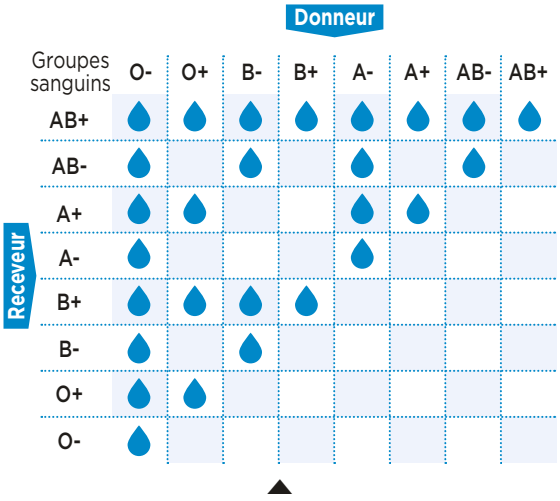
Mais force est de constater que le mécanisme liant groupes sanguins et infections n'est pas clair à ce jour. *« Il se peut que les antigènes servent d'accroche aux virus ou bactéries »*, suppose Laure Ségurel, généticienne et anthropologue (CNRS, Lyon). Ainsi, en fonction des infections rencontrées par les populations, les groupes sanguins ont pu se montrer tour à tour protecteurs ou désavantageux. Leur diversité se serait ainsi maintenue dans le temps sans que jamais A, B, AB ou O ne prenne définitivement le pas sur les autres. Il en serait de même pour les autres groupes, moins connus, comme pour le 40e identifié, le rare PEL négatif qui est *« exclusivement retrouvé à ce jour chez des Québécois d'ascendance française ancienne »*, selon Thierry Peyrard.

Un obstacle pour les transfusions et traitements

Si elles nous en apprennent plus sur notre histoire, ces variations deviennent un obstacle dans la médecine moderne. En particulier lors des transfusions, nécessaires dans des situations d'urgence mais aussi pour traiter des maladies du sang. En effet, si le sang transfusé diffère de celui du patient pour certains groupes sanguins particuliers, dits immunogènes parce qu'ils déclenchent de fortes réactions immunitaires, les conséquences peuvent être graves : les symptômes d'un accident transfu-

TRANSFUSION

La compatibilité des groupes A, B et O



Si dans la majorité des cas, les receveurs sont transfusés avec le sang d'un donneur de leur propre groupe sanguin, les personnes du groupe O- peuvent donner leur sang à un receveur de n'importe quel groupe, on les appelle « donneurs universels ». Celles appartenant au groupe AB+ sont, elles, des « receveurs universels ».

ANTHROPOLOGIE

Un système présent chez tous les primates

Le système de groupes sanguins ABO est présent sous une forme ou une autre chez tous les primates, d'après les travaux auxquels la généticienne et anthropologue Laure Ségurel a participé en 2012. *« Le gorille a par exemple perdu le A, et le chimpanzé le B »*, illustre-t-elle. *« Pourquoi ? Mystère total. »* En revanche, aucune espèce ne possède que du O, et les humains semblent les seuls à en avoir autant. *« Il est probable que le système ABO était déjà présent chez l'ancêtre commun des primates, il y a au moins 60 millions d'années »*, ajoute la chercheuse.

sionnel vont de la fièvre à… la mort. Le système ABO compte justement parmi les plus immunogènes. *« Ce n'est pas un hasard si ce système de groupe sanguin est le plus connu, car les anticorps sont générés très tôt et sans exposition préalable. Les accidents transfusionnels sont donc immédiats »*, explique France Pirenne, présidente de la Société française de transfusion sanguine. La faute aux bactéries qui peuplent nos intestins — le microbiote, encore lui ! Ces bactéries possèdent des sucres semblables aux A et B, qui miment une exposition à un sang étranger et entraînent la production d'anticorps anti-A pour les individus de groupe B, anti-B pour ceux de groupe A ou les deux pour ceux de groupe O.

Anticorps un jour, anticorps toujours

« Un anticorps un jour, un anticorps toujours », résume Thierry Peyrard. Autrement dit, une fois qu'un patient est immunisé contre un groupe sanguin, il est impossible de le lui administrer. Mais pour les spécialistes de la transfusion, ABO n'est que l'un des systèmes à surveiller. Parmi les 43 recensés à ce jour, cinq autres (Rh et Kell en priorité, puis Duffy, MNS et Kidd) sont également particulièrement immunogènes et donc surveillés avant de transférer du sang à un patient. Seuls leurs 14 antigènes les plus courants sont observés — si les 43 systèmes étaient analysés, pas moins de 376 antigènes différents devraient être pris en compte pour s'assurer de la compatibilité entre un donneur sanguin et un receveur. Un véritable casse-tête. En particulier lorsqu'il s'agit de soigner sur notre territoire des malades d'origine étrangère, dont le groupe sanguin courant dans leur région est rare en France. Ainsi, les donneurs compatibles manquent pour prendre en charge des patients originaires d'Afrique ou des Antilles qui souffrent de drépanocytose, une maladie du sang qui exige des transfusions régulières à vie… *« Rien qu'en Île-de-France, nous avons besoin de 25 000 poches de sang compatibles par an qui ne peuvent provenir que des donneurs de même origine géographique,* alerte France Pirenne. *C'est un véritable problème de santé publique.* » Il oblige parfois les médecins à réaliser des transfusions incompatibles répétées à l'origine d'accidents transfusionnels gravissimes.

RECHERCHE

Le rêve d'un sang universel

S'affranchir de la barrière des groupes sanguins permettrait *« de soigner rapidement dans des situations d'urgence comme ceux qui ont des groupes sanguins rares »*, explique France Pirenne, présidente de la Société française de transfusion sanguine. Les recherches en cours explorent deux pistes. D'abord, ne produire que du sang de groupe O négatif, donneur universel du système ABO. La dernière idée en date pour y parvenir est de transformer les sucres A et B pour en faire des O. Une tâche que peuvent assurer les enzymes de certaines bactéries comme l'a montré une étude de 2019 publiée dans *Nature Microbiology*.

PATRICK AILLARD/REA

Des globules rouges universels créés à partir de cellules souches pluripotentes, une piste explorée par les chercheurs.

Ensuite, créer des globules rouges universels en laboratoire à partir de cellules souches, capables de se transformer en n'importe quelle autre cellule de l'organisme. *« Mais le rendement de ces techniques est faible »*, regrette France Pirenne. Aussi, aujourd'hui, aucune poche de sang n'a encore été produite à partir de celles-ci.

STÉPHANE MAZIÈRES

« Le groupe A semble conférer une protection relative contre le choléra tandis que le groupe O y est plus sensible »

Stéphane Mazières, généticien et anthropologue, à la faculté de médecine de Marseille

« *Du fait de ces incompatibilités répétées, 30 à 40 % de ces patients développent des anticorps contre d'autres groupes sanguins, contre 3 à 4 % dans la population générale transfusée* », précise France Pirenne, qui appelle les personnes d'origine étrangère à également donner leur sang.

Une banque de 8000 poches de sang rare en France

Les personnes venues d'autres zones géographiques ne sont pas les seules en difficulté. En France, on dénombre pas de moins de 17 000 personnes qui présentent un groupe sanguin rare (c'est-à-dire présent chez moins de 0,4 % de la population). C'est le cas d'un patient suisse qui, hospitalisé pour une infection dans les années 1970, s'est révélé Rh-null, c'est-à-dire qu'il ne possède aucun des 55 antigènes du système Rh — dont le fameux D. Donneur universel, il ne peut en revanche recevoir que le sang d'un autre Rh-null. Or, en cinquante ans, seules 40 personnes dans le monde ont été identifiées comme telles ! Une source de stress importante pour cet homme, qui se contraint à des dons réguliers et à un style de vie prudent.

La France est néanmoins à la pointe de la prise en charge de ces cas exceptionnels, grâce à son Centre national de référence pour les groupes sanguins (CNRGS). Reconnu internationalement, il dispose d'une banque de 8000 poches de sang rare, conservées à -80 °C en Île-de-France. « *Notre pays a été pionnier en la matière : nous étions l'un des tout premiers au monde à créer un registre national de sujets avec un groupe rare et à créer une banque de sang rare* », relate Thierry Peyrard. Paradoxalement, en raison de la multiplicité des groupes sanguins existant, le sang rare ne le serait pas tant que ça. « *On estime que près d'un million de personnes en France ont un sang rare, mais la plupart l'ignorent car on ne le découvre que lors de soins médicaux ou d'un don du sang*, pointe-t-il. *On ne peut pas tout tester !* » Lui-même admettant qu'il pourrait avoir un sang rare sans le savoir. ■

E. SOUDAN/ALPACA/ANDIA.FR

Une fois collectés grâce aux dons, les échantillons de sang sont analysés afin de déterminer le groupe auquel ils appartiennent et de déceler d'éventuelles anomalies, avant de les stocker dans des poches.

GÉNÉTIQUE DES POPULATIONS

Première analyse des groupes sanguins des cousins disparus de « sapiens »

Fin juillet, des chercheurs français ont déterminé pour la première fois les groupes sanguins des cousins disparus d' *Homo sapiens* : Neandertal et Denisova. Ils ont étudié le génome de quatre femmes qui ont vécu entre 100 000 et 40 000 ans avant notre ère. Il s'agissait de trois néandertaliennes — deux provenant de l'Altaï (Russie) et une retrouvée en Croatie — et une dénisovienne provenant aussi de l'Altaï. « *Coup de chance, nous avons trouvé des individus A, B et O, donc la diversité ABO !* » raconte Stéphane Mazières, qui a participé à l'étude. Plus précisément les deux néandertaliennes de l'Altaï étaient A+, celle de Croatie B+, tandis que la dénisovienne était O+. « *Cela permet de penser que l'ancêtre commun à Neandertal, Denisova et* sapiens *devait probablement déjà être porteur de ces trois groupes sanguins* », indique Silvana Condemi, paéloanthropologue à l'université d'Aix-Marseille et première auteure. Mais ce n'est pas tout. Les scientifiques ont mis en évidence un allèle inconnu dans le génome des néandertaliennes qui a finalement été retrouvé chez deux personnes vivant aujourd'hui en Océanie. Une trace inédite d'un métissage entre *sapiens* et Neandertal. ■

Samantha Dizier avec C. G.

MAGAZINES, JOURNAUX, CARNETS, ENVELOPPES...

TOUT SAVOIR POUR NE PAS SE TROMPER DANS LE TRI DES PAPIERS

Vous êtes le premier acteur du recyclage grâce à votre geste de tri des papiers.
Tout savoir pour ne pas se tromper.

1. TOUS LES PAPIERS DU QUOTIDIEN SE RECYCLENT

Feuilles de papier, enveloppes, cahiers, journaux, magazines... sont parfaitement recyclables. Même avec des agrafes, spirales ou avec des éléments en plastique… Lors du recyclage, le papier est traité en plusieurs étapes de nettoyage et filtrage qui les éliminent.

2. ATTENTION, IL EXISTE DES FAUX-AMIS

Certains papiers portent le nom de papier mais ne se recyclent pas. Par exemple tous les papiers d'hygiène ou certains papiers cadeaux qui sont en plastique. D'autres « papiers » comme le papier photo ou le papier peint ont des traitements (plastification, résistance à la lumière, colle...) qui altèrent leur capacité de recyclage. Ils sont donc destinés au bac des ordures ménagères.

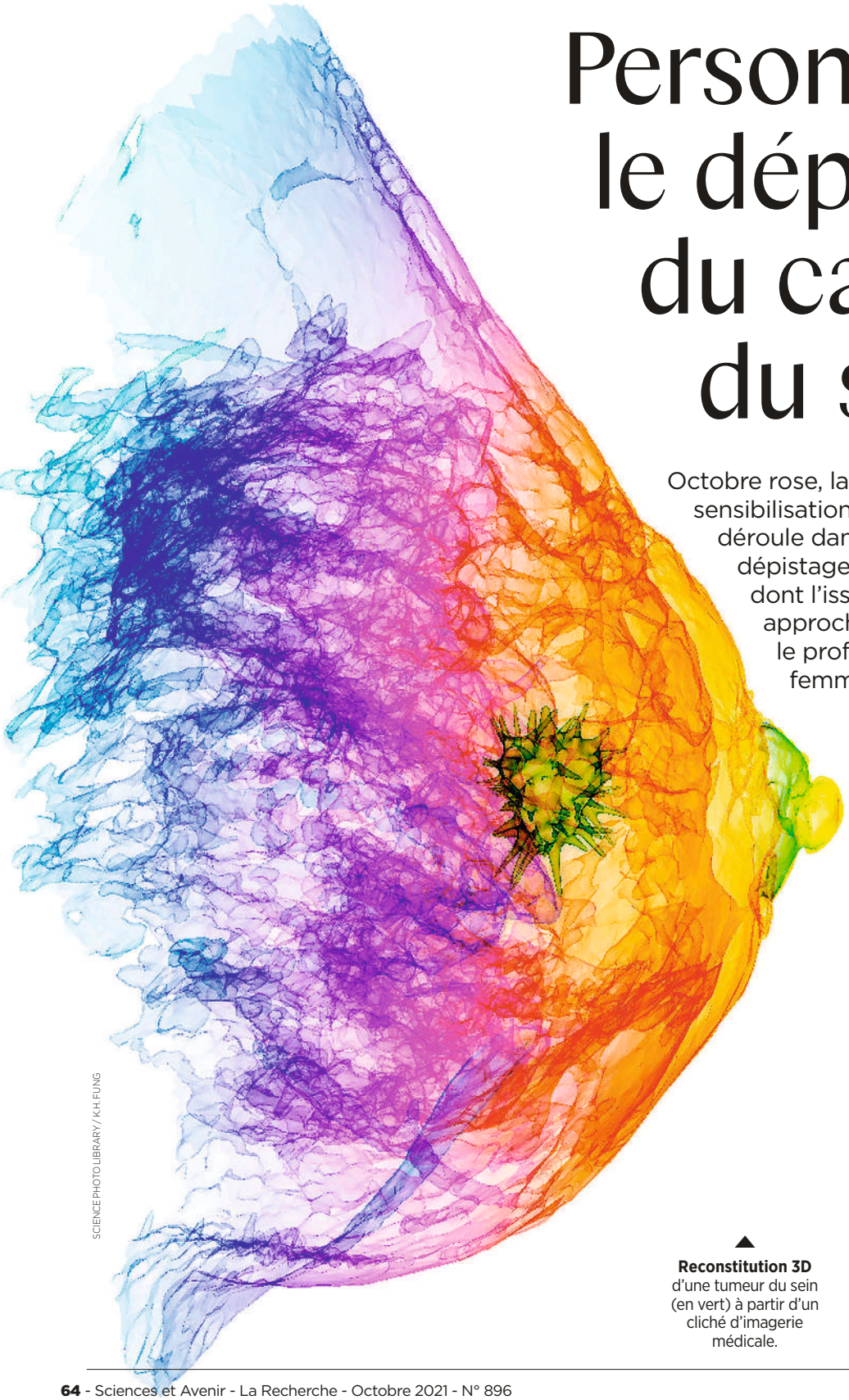
3. LES CONSIGNES DE TRI PEUVENT VARIER SELON LES COMMUNES

Vous l'aurez peut-être remarqué, on ne trie pas de la même façon partout en France, parfois tous les emballages et les papiers vont dans le même bac, parfois il faut les séparer. Peu importe le dispositif de collecte de nos papiers, ils sont traités pour être recyclés.

CITEO

Personnaliser le dépistage du cancer du sein

Octobre rose, la campagne annuelle de sensibilisation au cancer du sein, se déroule dans un contexte du recul du dépistage. Une situation alarmante dont l'issue pourrait être une approche personnalisée selon le profil de risque de chaque femme. Un essai est en cours.



SCIENCE PHOTO LIBRARY / K.H.FUNG

Reconstitution 3D d'une tumeur du sein (en vert) à partir d'un cliché d'imagerie médicale.

Depuis 2011-2012, le taux de participation au dépistage organisé du cancer du sein baisse, lentement mais sûrement *(voir la courbe ci-contre)*. Il est vrai que l'adhésion au système appelant les femmes de plus de 50 ans à réaliser une mammographie tous les deux ans n'a jamais guère dépassé les 50 % depuis sa mise en place en 2004. *« C'est terrible de voir que le dépistage profite à moins de la moitié de la population concernée alors que les statistiques montrent qu'il permet d'éviter un décès par cancer du sein sur cinq,* regrette Suzette Delaloge, chercheuse spécialisée dans la prévention et le dépistage des cancers du sein à Gustave-Roussy, à Villejuif (Val-de-Marne), premier

centre contre le cancer d'Europe. *Les campagnes sont pourtant très incisives, avec des rappels, des relais de sensibilisation importants comme Octobre Rose en ce moment.* »

Mais le dépistage tel qu'il est organisé aujourd'hui présente aussi de trop nombreux inconvénients. Sur l'ensemble des cancers détectés, 10 % à 20 % sont des surdiagnostics, c'est-à-dire qu'ils ne seraient vraisemblablement jamais développés au point d'entraver la vie des patientes chez qui ils ont été diagnostiqués. Par ailleurs, environ 3 % des femmes qui répondent à l'appel de la mammographie subiront une biopsie qui ne révélera rien d'inquiétant. C'est peu, mais déjà trop pour un examen invasif générateur d'angoisse qui consiste à prélever un échantillon de tissu. Autre écueil, les « cancers d'intervalles », qui se manifestent entre deux examens de contrôle et représentent 17 % des cancers repérés chez les femmes qui participent au dépistage. Bref, le dispositif actuel n'est pas à la mesure des progrès techniques et scientifiques faits en termes de dépistage et prédiction ces dernières années.

Un dépistage individualisé est plus efficace

« *On peut faire beaucoup mieux !* », promet la chercheuse qui coordonne la vaste étude européenne MyPEBS (My Personalising Breast Screening, Mon dépistage personnalisé du sein) à laquelle participent six pays : la France en chef de file avec la Belgique, l'Espagne, Israël, l'Italie et le Royaume-Uni. L'objectif de cet essai clinique est de démontrer qu'un dépistage plus individualisé, adaptant la fréquence et le type d'examens au risque de chaque femme, sera plus efficace, moins contraignant pour une partie d'entre elles et donc mieux suivi qu'un programme appliquant un modèle unique pour toutes. Sur les 85 000 femmes qui participeront à l'étude, la moitié suivront un dépistage classique, tandis qu'il sera personnalisé dans l'autre groupe selon un « score de risque ». Celui-ci est calculé à partir des antécédents familiaux et personnels, de la densité mammaire — « *un marqueur assez efficace en prédiction lorsqu'il est intégré au reste* », selon Suzette Delaloge — et de facteurs génétiques. Ces derniers seront étudiés grâce à un génotypage, une technique plus simple techniquement que le séquençage du génome entier, qui permet, à partir d'un test salivaire, de déterminer des variations génétiques à certaines positions stratégiques du génome. Ce sont ainsi jusqu'à 313 variations qui seront examinées pour contribuer à prédire le risque individuel des femmes. Particulièrement développée en recherche sur le sein, la technique passe son banc d'essai en conditions réelles.

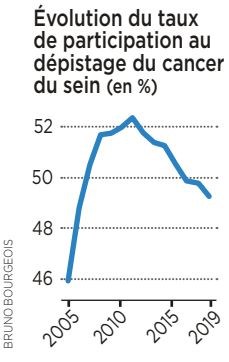
« *Les femmes qui seront à risque augmenté bénéficieront de mammographies plus rapprochées, voire d'IRM annuelles, tandis que celles à risque moyen pourront continuer le dépistage tous les deux ans. Enfin, en cas de score de risque faible, les examens ne seront pas proposés avant quatre ans, au terme de l'étude* », détaille la chercheuse. À la fin, c'est le nombre de cancers avancés ainsi que la réduction des faux positifs qui permettront d'évaluer la pertinence de cette approche. L'étude permettra en outre de juger de la faisabilité d'un génotypage à grande échelle en rassemblant les données au Centre national de recherche en génomique humaine au Génopôle d'Evry, dans un cadre académique indépendant des laboratoires. Pour respecter les conditions réelles d'un dépistage organisé, plus de 600 investigateurs — médecins généralistes, gynécologues, radiologues — mènent l'essai au plus près des participantes.

Les candidatures sont ouvertes et bienvenues

Si l'étude MyPEBS se voyait couronnée de succès, elle pourrait aussi permettre de proposer le dépistage à certaines femmes dès 40 ans. « *En l'absence de dépistage organisé chez les 40-50 ans, on manque quand même 25 % des cancers,* explique Suzette

VOISIN/PHANIE

L'essai européen MyPEBS vise à réaliser les mammographies selon une fréquence adaptée aux antécédents et aux facteurs génétiques de chaque femme.



BRUNO BOURGEOIS

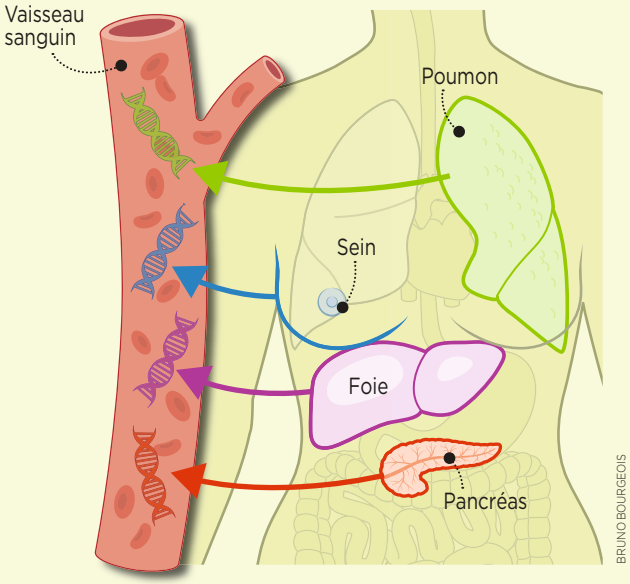
CONTEXTE

Tous les deux ans, les femmes de 50 à 74 ans reçoivent un courrier les invitant à réaliser une mammographie. Ce dépistage organisé du cancer du sein mis en place en 2004 permet aujourd'hui d'éviter un décès par cancer du sein sur cinq. Pour rendre le dépistage à la fois plus efficace et mieux accepté socialement, une étude européenne, MyPEBS, pilotée par le centre Gustave-Roussy de Villejuif (Val-de-Marne), teste une approche plus personnalisée et plus précoce.

ESSAIS

Les tests sanguins bientôt à la rescousse

Dépister une large gamme de cancers à partir d'une simple analyse sanguine avant même qu'ils soient visibles à l'imagerie. C'est la promesse portée par les « biopsies liquides », car elles détectent de façon peu invasive les fragments d'ADN voire les cellules circulantes qu'une tumeur a tendance à libérer dans le sang dès les premiers stades de développement. S'il se fait attendre, ce Graal du dépistage est en passe de démontrer son efficacité sur certains cancers pour lesquels les outils de contrôle manquent cruellement. C'est ce que montre la troisième vague d'essais menés par l'entreprise californienne GRAIL qui a levé 1,5 milliard de dollars il y a deux ans pour tenir la promesse. La start-up soutenue par Bill Gates et Jeff Bezos utilise une méthode de séquençage génétique de pointe combinée à des techniques d'intelligence artificielle pour repérer et caractériser l'ADN tumoral circulant. Plus de 50 types de cancers peuvent ainsi être recherchés, le test parvenant dans 88,7 % des cas à préciser le site de la tumeur chez près de 3000 patients inclus dans l'étude. Mais aussi prometteur soit-il, l'essai montre que la sensibilité de l'analyse varie beaucoup selon le type et le stade d'évolution des cancers. Pour le sein par exemple, les facteurs prédictifs déjà disponibles surpassent largement les résultats de la biopsie liquide. Mais pour des tumeurs sur des organes profonds qui ne disposent encore d'aucune option de dépistage, l'analyse sanguine apporte désormais un vrai plus. C'est le cas du pancréas en particulier, mais aussi de l'œsophage, du foie ou encore des poumons. Suffisant pour que le test Galleri de l'entreprise commence à être commercialisé aux États-Unis l'été dernier. Et bientôt en France ?



La biopsie liquide permet de détecter l'ADN des tumeurs (sein, pancréas, foie, poumon) qui circulent dans le sang.

Delaloge. *C'est dans cette tranche d'âge que la question d'un programme de dépistage à valeur prédictive se pose le plus.* » Il faut bien peser d'un côté la gravité potentielle d'une tumeur qui se serait développée entre 45 et 50 ans avant d'être finalement repérée ; de l'autre, la pertinence du calcul du risque dans une tranche d'âge globalement moins à risque. Si l'évaluation n'est pas bonne, elle peut conduire à une surveillance inutile ou, à l'inverse, pas assez resserrée, laissant passer des cancers chez des femmes jugées peu à risque. « *Le niveau de prédiction est plutôt bon même s'il est imparfait. Et risque faible ne signifie pas risque zéro, juste que le dépistage ferait peser plus de risque qu'il n'apporte de bénéfice* », précise-t-elle.

À ce jour, seules 17 000 femmes environ ont rejoint l'étude MyPEBS sur les 85 000 attendues. Les candidatures sont donc ouvertes et bienvenues pour compléter ce test qui pourrait être déterminant s'il conduisait à une révision du protocole en population générale. Ce serait la première véritable initiative de médecine prédictive en santé publique. ■

Hugo Jalinière @HugoJaliniere

POUR EN SAVOIR PLUS

Pour participer à l'essai MyPEBS : **sciav.fr/896mypebs**

GUSTAVE ROUSSY

« C'est dans la tranche d'âge des 40-50 ans que la question d'un dépistage à valeur prédictive se pose le plus »

Suzette Delaloge, chercheuse spécialisée dans la prévention et le dépistage du cancer du sein à Gustave-Roussy, à Villejuif

Photo: © ACF / Emmanuel Simiand - RCA. Réalisation : Atropine

ENSEMBLE, TRANSMETTONS-LEUR UN MONDE SANS FAIM

Choisir de transmettre un legs ou une assurance-vie à Action contre la Faim, c'est faire le choix d'un monde plus juste. Par ce geste, vous nous aiderez concrètement et durablement à sauver des vies et à faire reculer la faim. Nous sommes à vos côtés pour vous permettre de réaliser ce magnifique projet, pas à pas et en confiance.

DEMANDE DE DOCUMENTATION GRATUITE ET CONFIDENTIELLE

☐ **OUI, je souhaite recevoir gracieusement, en toute confidentialité et sans engagement, mon livret sur les legs et les assurances-vie.**

☐ Mme ☐ M.

Nom : ..... Prénom : .....

Adresse : .....

.....

Code postal : ⌊_____⌋ Ville : .....

Mon numéro de tél. : ⌊_____⌋ E-Mail : ..... @ .....

ACTION CONTRE LA FAIM

Bulletin à retourner sous enveloppe affranchie à : Action contre la Faim - À l'attention de Manon Besson
14/16 Boulevard de Douaumont - CS 80060 - 75854 Paris Cedex 17
Et pour un échange personnalisé, n'hésitez pas à nous contacter :
01 70 84 84 84 (Ligne directe) - servicelegs@actioncontrelafaim.org

DON en CONFIANCE

21PLO9SA

Conformément à la loi Informatique et libertés du 6 janvier 1978, vous disposez d'un droit d'accès de suppression et de rectification aux données personnelles vous concernant en vous adressant au siège de notre organisation.

Una activité physique modérée et régulière (marche, vélo…) diminue de manière significative le risque de tomber malade.

PLAINPICTURE

Cinq questions pour bien se préparer à l'hiver

La meilleure arme contre les infections hivernales, c'est la prévention, qui passe essentiellement par la vaccination contre la grippe et les gestes barrières. Mais mieux vaut aussi s'assurer d'avoir un système immunitaire au top de sa forme.

Par Émilie Gillet, avec Agence Forum News

1 Les gestes barrières protègent-ils contre les infections banales de l'hiver ?

Chaque année, des messages de santé publique rappellent l'importance de se laver les mains régulièrement pour lutter contre les infections hivernales, de tousser dans son coude, d'utiliser des mouchoirs à usage unique… Mais ils ne sont pas toujours reçus par le grand public. Or l'hiver 2020-2021, placé sous le signe de la pandémie de Covid-19, est venu apporter la preuve de l'intérêt de ces mesures. Et plus encore, de porter un masque, voire de s'isoler lorsqu'on est contagieux. Ainsi, l'hiver dernier, aucune épidémie de grippe n'a été détectée dans tout l'hémisphère Nord. De mémoire d'épidémiologiste, cela n'était jamais arrivé auparavant. Quant à la gastro-entérite et à la bronchite, les nombres de cas ont été significativement beaucoup plus bas cet hiver par rapport aux années précédentes.

2 Pourquoi l'alimentation peut-elle favoriser notre immunité ?

Notre microbiote intestinal influe sur le risque infectieux : d'abord en « occupant la place », il empêche la colonisation par des bactéries pathogènes, ensuite en interagissant avec le système immunitaire, il le maintient dans un état de veille permanent. Or, notre microbiote se nourrit grâce à nous ! Un régime riche en fibres (fruits et légumes) lui permet de fonctionner correctement, et les produits fermentés (yaourts, formages, choucroute, pickles…) entretiennent sa composition. À l'inverse, une alimentation riche en gras, sucres et sel va le déstabiliser et favoriser une inflammation chronique dans l'ensemble de l'organisme. Or cette légère sur-sollicitation permanente de notre immunité peut faire le lit de certaines affections métaboliques comme le diabète, et favoriser les infections. Enfin, rien ne vaut les nutriments apportés directement par une alimentation saine, variée et équilibrée, qui rend superflue la consommation de compléments alimentaires.

3 Le sommeil a-t-il une influence sur le risque d'une infection ?

En 2016, une étude américaine publiée dans *Jama Internal Medicine*, et portant sur plus de 22 000 adultes suivis pendant sept ans, a conclu que les personnes ayant une faible qualité de sommeil (nuit de moins de six heures, somnolence diurne) consultent plus souvent un médecin pour un rhume, une infection pul-

Grippe saison 2019-2020 : 1,25 million de consultations médicales / 60 000 passages aux urgences / 6000 hospitalisations / Environ 3700 décès

SOURCE : SANTÉ PUBLIQUE FRANCE

Ester-C® PLUS IMMUNE COMPLEX

La formule complète pour vos défenses immunitaires

Ester-C® (vitamine C), zinc, sureau, échinacée, vitamine D, etc...

Solgardez-vous bien !

SOLGAR
Since 1947

En pharmacie et magasins de diététique

Pour votre santé, mangez au moins cinq fruits et légumes par jour. www.mangerbouger.fr

solgar.fr

AVIS D'EXPERT

PR JEAN-POL FRIPPIAT DIRECTEUR DU LABORATOIRE STRESS, IMMUNITÉ ET PATHOGÈNES, UNIVERSITÉ DE LORRAINE

« Le stress chronique affaiblit nos défenses immunitaires »

DR

Quels sont les effets d'un stress aigu sur notre immunité ?
Ils sont plutôt bénéfiques ! Et c'est parfaitement normal, car le stress aigu est une réponse adaptative à un changement de l'environnement. Il mobilise le système immunitaire qui va se mettre en alerte et aura pour effet d'augmenter les fonctions cytotoxiques, c'est-à-dire le fait de tuer les cellules infectées par des pathogènes, et de favoriser la reconnaissance des antigènes.

Que se passe-t-il néanmoins si le stress devient chronique ?
Le système immunitaire ne parvient plus à revenir à l'équilibre, et il va progressivement s'affaiblir. Le stress chronique engendre un état micro-inflammatoire dans tout l'organisme. Cela diminue l'efficacité des lymphocytes T comme la production d'anticorps, et favorise la résurgence de virus latents, tels que le virus de l'herpès labial par exemple [ou boutons de fièvre]. De sorte que le stress chronique favorise la survenue d'infections ou augmente le temps de récupération après celles-ci.

Comment éviter ces effets nocifs ?
Quand le stress devient de plus en plus présent, il faut apprendre à le gérer. Par ailleurs, quelques règles d'hygiène de vie permettent de diminuer ces effets négatifs : il faut par exemple pratiquer une activité physique régulière et modérée. En période de stress, on peut aussi faire évoluer son alimentation en augmentant notamment les apports en vitamine C et en prébiotiques (aliments fermentés) qui favorisent le bon fonctionnement du système immunitaire. ■

Propos recueillis par É. G.

monaire ou une otite infectieuse. D'autres études ont confirmé ce lien, mais les mécanismes sous-jacents sont encore mal compris. L'hypothèse est que pendant le sommeil, le système immunitaire se régénère. D'ailleurs, plusieurs recherches ont montré que la réponse immunitaire après un vaccin est de meilleure qualité chez les personnes dormant suffisamment. Cela a notamment été observé avec le vaccin antigrippal mais aussi celui contre l'hépatite B. Pour autant, rien de sert de s'inquiéter si on a une mauvaise nuit de temps en temps, c'est un facteur qui joue surtout sur le long terme.

4 Quels sont les liens entre activité physique et défenses immunitaires ?

De nombreux travaux l'ont démontré, avoir une activité physique modérée et régulière diminue significativement le risque de tomber malade. En 2018, une étude britannique publiée dans *Aging Cell* révélait que des cyclistes amateurs de 55 à 79 ans ont un taux de certains types de lymphocytes T, l'un de nos remparts immunitaires, plus élevé que des personnes de 20 à 36 ans en bonne santé mais pratiquant peu ou pas de sport. Et comparés à des sédentaires du même âge, les sportifs amateurs ont un thymus (petite glande située dans la partie supérieure du thorax) en meilleure forme : or c'est là notamment que sont produits ces lymphocytes T. Une autre étude, américaine publiée en février dans *Nature*, expliquait quant à elle que certaines cellules situées dans notre moelle osseuse perçoivent les pressions mécaniques provoquées par les mouvements du corps et, en réponse, stimulent la production de lymphocytes. D'autres mécanismes sont certainement à l'œuvre, mais il reste à les découvrir.

5 Pourquoi peut-on se faire vacciner contre la grippe chaque année ?

Chaque hiver, l'épidémie de grippe touche deux à six millions de Français et fait plusieurs milliers de morts (hors situation sanitaire exceptionnelle comme en 2020-2021). Le vaccin antigrippal est aujourd'hui le meilleur moyen pour prévenir l'infection et surtout réduire le risque de complications, voire de décès chez les personnes les plus fragiles. Or les souches de virus grippaux qui circulent naturellement dans les populations évoluent d'une année à l'autre, de sorte qu'il faut réactualiser régulièrement la composition du vaccin pour coller au plus près de la réalité virale. Voilà pourquoi il est nécessaire de se faire vacciner chaque année, de préférence au début de l'hiver, si l'on veut être mieux protégé. Pour les personnes les plus à risque, le vaccin est gratuit. Il s'agit des plus de 65 ans, des femmes enceintes, des personnes atteintes de certaines maladies chroniques (diabète, insuffisance cardiaque, respiratoire ou rénale grave, déficit immunitaire…) et celles ayant un indice de masse corporelle (IMC) supérieur à 40. ■

NOUVEAU

TRAMIER
DEPUIS 1863

Naturellement riche en
Oméga 3

◆ L'ALLIANCE UNIQUE ◆
DE 3 HUILES DE GRAINES

Colza, Pépins de Raisin & Tournesol

Un **goût délicat** à utiliser au quotidien en assaisonnement et pour la cuisson pour aider au maintien d'une **cholestérolémie normale**.*

Découvrez en plus sur les atouts de chaque huile sur tramier.fr

* L'effet bénéfique est obtenu par la consommation journalière de 2 g d'acide alpha-linolénique. Le remplacement de graisses saturées par des graisses insaturées dans le régime alimentaire contribue au maintien d'une cholestérolémie normale. L'acide oléique est une graisse insaturée. Une alimentation variée et équilibrée et un style de vie sain sont importants.

POUR VOTRE SANTÉ, PRATIQUEZ UNE ACTIVITÉ PHYSIQUE RÉGULIÈRE.
WWW.MANGERBOUGER.FR

Toutes les saveurs des huiles

Consommer des huiles différentes permet de bien profiter des bienfaits nutritionnels de chacune.

Olive, chanvre, avocat, soja… Une mer d'huiles envahit nos placards, apportant de nouvelles saveurs et une touche d'exotisme à nos plats, quand auparavant, une unique bouteille au contenu jaune pâle, pour tous usages et au goût neutre, trônait dans la cuisine. Voilà déjà plus de 7000 ans que dans le bassin méditerranéen, le fruit de l'olivier est broyé pour en extraire l'huile. Source d'énergie, constituant majeur de nos cellules et hormones, le « gras » est indispensable à notre organisme. Selon l'Agence nationale de sécurité sanitaire des aliments (Anses), les lipides doivent représenter 35 à 40 % des apports énergétiques fournis par l'alimentation, soit 90 g par jour pour un adulte — sachant qu'une cuillère à soupe d'huile en apporte environ 15 g. Toutefois aucune huile ne possède une composition nutritionnelle parfaite. Il faut donc jouer de leur complémentarité et en avoir plusieurs sortes pour couvrir nos besoins journaliers.

Elles fournissent divers types d'acides gras

Les plus convoités sont les acides gras polyinsaturés, dont l'acide alpha-linolénique (ALA) (ou oméga-3) et l'acide linoléique (ou oméga-6). Ils sont dits essentiels car l'organisme ne sait pas les fabriquer et doit les puiser dans l'alimentation, permettant de fluidifier le sang, prévenir les maladies cardio-vasculaires et lutter contre le vieillissement. Les huiles de noix et de colza en apportent de bonnes quantités (respectivement 12 g/100 g et 7,5 g/100 g), et une cuillère à café d'huile de cameline suffit à couvrir nos besoins quotidiens en ALA (2 g/jour). Les huiles de pépin de raisin et de tournesol sont riches en oméga-6 (respectivement 63,7 g/100 g et 56,3 g/100 g), mais attention à ne pas en abuser car en excès, ces acides gras ont un effet pro-inflammatoire. L'acide oléique (ou oméga-9), un acide gras mono-insaturé (AGPI) aux effets neutres sur la santé, est présent en quantité dans les huiles d'olive (75 g/100 g d'oméga-9), de noisette (72,7 g/100 g), de colza (55,2 g/100 g), d'avocat (50,3 g/100 g). Les acides gras saturés se retrouvent dans les huiles de palme (49,3 g/100) et de coprah (86,5 g/100 g) (1).

111 000 tonnes

d'huile d'olive sont consommées par an en France alors que la production nationale ne représente que 5860 tonnes en 2018/2019.

(SOURCE : ASSOCIATION FRANÇAISE INTERPROFESSIONNELLE DE L'OLIVE.)

Elles apportent des antioxydants

Obtenue à partir d'olives fraîches, l'huile d'olive est un concentré de composés phénoliques

BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR - LA RECHERCHE

ACIDES GRAS SATURÉS Acides gras ayant des atomes de carbone totalement saturés en hydrogène. Ils se trouvent dans les graisses animales (beurre, lait, viande…) ainsi que dans les huiles de coco et de palme.

POINT DE FUMÉE Température à partir de laquelle les matières grasses se dénaturent, ce qui entraîne la formation de différentes molécules volatiles dont l'acroléine, reconnaissable par le dégagement d'une fumée et d'une odeur âcre irritante.

HUILE RAFFINÉE Huile dont l'extraction par pression des fruits ou graines s'accompagne d'un chauffage à des températures élevées et d'ajouts de solvants (hexane). Elle est désodorisée par différents processus chimiques.

(oléocanthal) et de vitamine E (tocophérol), également présente dans les huiles de tournesol (57,3 mg/100 g), de noisette (28,6 mg/100 g) ou encore de foie de morue (30 mg/100 g). Ce puissant antioxydant protège les lipides constitutifs des membranes cellulaires et renforce le système immunitaire. L'huile d'avocat contient en outre des caroténoïdes (lutéine). En ajouter 24 g (une cuillère à soupe et demie) à un plat permettrait de multiplier par 5 à 15 l'absorption des caroténoïdes issus d'autres aliments (carottes, épinards, etc.) présents dans l'assiette (2).

Limiter les huiles riches en acides gras saturés

C'est ce que recommande l'American Heart Association, qui met en garde contre une consommation excessive d'huile de coco. Riche en acides gras saturés (86 % contre 55 % pour le beurre), elle tendrait à augmenter le taux de cholestérol LDL (ou mauvais cholestérol), facteur de risque cardio-vasculaire, moins que le beurre toutefois (3). *A contrario*, certaines huiles aideraient à améliorer des marqueurs cardiovasculaires. Ainsi, des patients atteints de maladies coronariennes ayant reçu une supplémentation de 2 g d'huile de cumin noir pendant huit semaines ont vu baisser leur pression artérielle systolique (-9,52 mmHg) et diastolique (-8,26 mmHg) ainsi que leur glycémie à jeun (-4,32 mg/dl) par rapport aux participants du groupe placebo ayant consommé de l'huile de tournesol (4).

Bien choisir son huile de cuisson

Les huiles particulièrement riches en oméga-3 (cameline, lin, chanvre) doivent être consommées crues car la cuisson détruit ces acides gras protecteurs. Les plus résistantes à la chaleur sont les huiles de tournesol (point de fumée 232 °C), de coco et d'arachide (230 °C), de pépins de raisin, raffinées (216 °C) et d'olive vierge extra (point de fumée 195 °C). Toutefois, des chercheurs ont montré qu'après des chauffes répétées dans une friteuse classique à 190 °C, certaines huiles, comme celle de tournesol, produisent rapidement de grandes quantités d'aldéhydes (ou acroléine), des composés considérés comme génotoxiques et cytotoxiques. Les auteurs conseillent donc de jeter le bain de friture après chaque utilisation (5).

Attention à leur origine

La Direction générale de la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes (DGCCRF) constate depuis plusieurs années la persistance d'un certain nombre de tromperies concernant les huiles d'olive. Par exemple, la mention sur l'étiquetage d'une catégorie supérieure à sa catégorie réelle (huile d'olive « vierge extra » à la place d'huile d'olive « vierge »), l'absence d'indication de l'origine, la pratique de mélanges avec de l'huile raffinée de type colza ou tournesol (6). Pour s'assurer de leur qualité, il est recommandé de sélectionner une huile AOP, AOC ou d'origine biologique, vierge extra extraite à froid, car les graines ou oléagineux qui les composent sont alors pressés à température ambiante et de façon mécanique, sans traitement chimique. ■

Sylvie Boistard @syboistard

PHILIPPE LEGRAND Directeur du Laboratoire de biochimie-nutrition humaine de l'Inrae, à Rennes

Huiles de colza et d'olive, les deux indispensables

« L'huile de colza a toute sa place en cuisine car elle répond aux besoins d'acides gras polyinsaturés de type d'acide linoléique (ALA), précurseur végétal des acides eicosapentaénoïque (EPA) et docosahexaénoïque (DHA). L'associer à de l'huile d'olive est intéressant car celle-ci, malgré l'absence d'apport en oméga-3, fournit de l'acide oléique (oméga-9) en quantité, peu d'acides gras saturés (acides palmitique et stéarique) ainsi que de l'acide linoléique (oméga-6) sans excès. De nombreuses études ont montré les effets bénéfiques d'une consommation régulière pour la santé cardio-vasculaire, surtout en raison de sa richesse en composés phénoliques, de puissants antioxydants. »

(1) Table nutritionnelle Ciqual, Anses.

(2) Carotenoid absorption from salad and salsa by humans is enhanced by the addition of avocado or avocado oil, Unlu NZ. et al, *J Nutr*, 2005.

(3) Dietary fats and cardiovascular disease: a presidential advisory from the American Heart Association, Sacks F. et al, *Circulation*, 2017.

(4) Effects of nigella sativa oil supplementation on selected metabolic parameters and anthropometric indices in patients with coronary artery disease: a randomized, double-blind, placebo-controlled clinical trial, Avakoli-Rouzbehani OM. et al, *Phytotherapy Research*, 2021.

(5) Aldehydes contained in edible oils of a very different nature after prolonged heating at frying temperature: presence of toxic oxygenated α, β unsaturated aldehydes, D. Guillén M. et al, *Food Chemistry*, 2012.

(6) Huile d'olive, une origine toujours incertaine, DGCCRF, www. economie.gouv.fr.

Dans l'intimité du tyrannosaure

Vitesse de déplacement, rôle de la queue, force de la mâchoire… Le monde effrayant du « T. rex » prend chair grâce aux études qui se succèdent et permettent de redessiner le portrait du plus emblématique des dinosaures.

Par Joël Ignasse @ IgnasseJ

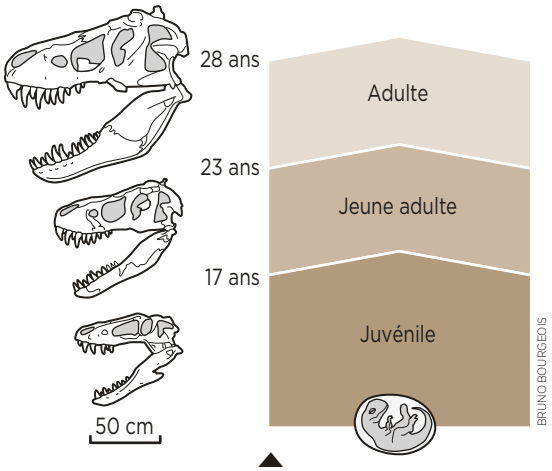
WARPAINTCOBRA/ISTOCK / GETTY IMAGES PLUS

Apparu il y a environ 68 millions d'années, « Tyrannosaurus rex » vivait dans une région qui correspond aujourd'hui à la partie ouest de l'Amérique du Nord.

MIKE BINK

Le fossile de Trix ici exposé au Naturalis Biodiversity Center à Leyde (Pays-Bas) a été mis au jour en 2013 au Montana (États-Unis). Cette femelle « T. rex » de 67 millions d'années devait peser 5 tonnes et mesurait 13 mètres de long pour 4 m de hauteur.

C'est l'un des *Tyrannosaurus rex* les plus âgés jamais découverts. Le spécimen est aujourd'hui l'attraction du Naturalis Biodivesity Center à Leyde (Pays-Bas). Mais avant de reposer dans son écrin conçu sur mesure, il a fait le tour de l'Europe. Plus d'un million de personnes ont pu l'admirer en Autriche, en Espagne, au Portugal, en Écosse, mais aussi à Paris, en 2018, au Muséum national d'histoire naturelle. Son nom : Trix. Squelette fascinant pour les visiteurs et objet de recherche sans précédent pour les paléontologues. Les publications scientifiques se succèdent, aux côtés d'autres portant sur l'étude des *T. rex* juvéniles. De quoi redessiner le portrait du plus emblématique des dinosaures. Bienvenue dans une machine à remonter le temps qui nous emmène au moins 67 millions d'années en arrière.



L'analyse des os de « T. rex » permet de comprendre comment à partir d'un œuf de la taille d'un ballon de basket il devient un monstre de 5 tonnes après plus de 20 ans de croissance.

Sur sa grande île-continent, la Laramidia, qui recouvre ce qui est aujourd'hui la partie ouest de l'Amérique du Nord, Trix déambule d'un pas tranquille. Nul danger ne guette cette femelle *Tyrannosaurus rex* : avec ses 12 mètres de longueur pour 4 mètres de haut et un poids de 5 tonnes, c'est la terreur du coin. La reine des lézards tyrans selon la signification latine de son nom scientifique. Son allure est rythmée par le balancement de sa queue, « *comparable à un pont suspendu avec une tonne de muscles à l'intérieur* », décrit Pasha van Bijlert, de l'université Vrije à Amsterdam (Pays-Bas). Habituellement spécialisé dans l'étude des mouvements humains, le chercheur s'est cette fois intéressé au fossile de Trix, extirpé en 2013 du sol du Montana (États-Unis), dans lequel il reposait depuis 67 millions d'années. Presque intégralement conservé, son squelette a permis de produire une reconstruction en 3D des os, des ligaments et des muscles de sa queue et même de l'animer numériquement : à chaque pas, le gigantesque appendice de Trix bat la mesure de haut en bas, à une fréquence qui le fait entrer en résonance avec le reste du corps. À l'image d'un enfant sur une balançoire, l'organisme ne dépense qu'un minimum d'énergie pour générer d'amples mouvements.

La mâchoire la plus puissante jamais connue

Selon une étude publiée en avril dans la revue *Royal Society Open Science*, la vitesse moyenne du dinosaure géant n'était pas très élevée : 1,28 m/s, soit 4,6 km/h. Peu ou prou celle d'un humain. Trix peut ainsi flâner des heures sans trop se fatiguer tout en étant capable de piquer un petit sprint quand elle tombe sur une proie. Mais, là encore, ses performances ne sont pas très impressionnantes : entre 20 et 40 km/h au maximum. « *Trop volumineux, les* T. rex *adultes ne pouvaient pas courir correctement ni très vite* », insiste Stephen L. Brusatte, paléontologue à l'université

RECENSEMENT

La population de « T. rex » évaluée

Combien de *T. rex* ont foulé les terres de Laramidia au cours des quelque 2,5 millions d'années de règne de cette espèce ? Environ 2,5 milliards en 127 000 générations ! C'est en tout cas l'estimation publiée en avril dans la revue *Science* par Charles Marshall, directeur du musée de paléontologie de l'université de Californie à Berkeley (États-Unis). Son calcul s'appuie sur la loi de Damuth qui relie la masse corporelle à la densité de population d'animaux vivants. « *Une étude élégante, bien qu'elle doive nécessairement faire de nombreuses hypothèses car les archives fossiles sont très pauvres. Donc obtenir un décompte fiable est un défi* », commente Steve Brusatte, paléontologue à l'université d'Édimbourg (Royaume-Uni). D'ailleurs l'estimation de Charles Marshall oscille entre 140 millions d'individus et 42 milliards… Au moins peut-on être sûr que des millions de *T. rex* se sont succédé sur Terre avant qu'ils ne disparaissent en même temps que tous les autres dinosaures non aviens, à la suite de l'impact d'un astéroïde géant. C'est aussi la preuve que le processus de fossilisation est quelque chose de très rare puisque sur ces millions d'individus qui ont peuplé la planète, moins d'une centaine ont été retrouvés ! Et Trix est parmi les mieux conservés.

AKG-IMAGES/SCIENCE PHOTO LIBRARY/ CLAUS LUNAU

Les tyrannosaures juvéniles avaient des bras proportionnellement plus longs que ceux des adultes et étaient plus véloces (vue d'artiste).

d'Édimbourg (Royaume-Uni). Cette relative lenteur n'empêche pas Trix d'être une redoutable prédatrice. Ses proies sont à l'image de ses gigantesques proportions : pour l'essentiel des dinosaures herbivores comme des *Edmontosaurus* (10 m de long pour 4 t) ou des *Triceratops* (8 ou 9 m de long pour une dizaine de tonnes). Sa technique de chasse préférée consiste à se tenir à l'affût à l'orée de la forêt, prête à bondir sur l'infortuné dinosaure qui passe par là. Une fois ferrée, la proie a peu de chances de s'en sortir : la mâchoire, le crâne et le cou de Trix sont bâtis pour former un piège létal. Aucun animal ayant vécu sur Terre n'a été doté d'une morsure aussi puissante capable d'infliger une pression de 30 t/cm^2 au niveau des dents comme l'a calculée Paul Gignac de l'université d'État de l'Oklahoma (États-Unis) dans un travail publié dans la revue *Scientific Reports*. De quoi s'enfoncer profondément dans la chair, jusqu'à l'os, et arracher le tout pour n'en faire qu'une bouchée. Même les os font partie du menu. Broyés, ils fournissent une source d'énergie supplémentaire (la moelle osseuse) à laquelle peu de ses contemporains ont accès. Et l'animal peut distinguer très finement ce qu'il croque grâce au réseau de nerfs dense et complexe inséré dans la mandibule.

Les jeunes, plus agiles, aident à courser les proies

Trix peut également chasser en groupe et bénéficier ainsi du soutien de précieux alliés bien plus véloces qu'elle : les jeunes tyrannosaures, capables de courser leurs proies… et de les rabattre vers sa monstrueuse mâchoire. *« Les jeunes* T. rex *étaient plus agiles et plus rapides ; ils avaient les bras proportionnellement plus longs et une morsure moins puissante que celle d'un adulte »*, explique Thomas R. Holtz du département de géologie de l'université du Maryland (États-Unis). Des différences qui pourraient en outre expliquer un constat qu'ont fait les paléontologues sur le territoire où régnait *T. rex*, mais aussi en Mongolie, là où s'épanouissait *Tarbosaurus*, le cousin asiatique du tyrannosaure : la diversité des dinosaures carnivores de taille intermédiaire, entre 50 kg et une tonne, y est bien plus faible qu'ailleurs et qu'à toutes les autres périodes du mésozoïque. Pour Thomas R. Holtz, qui a publié ses conclusions en juin dans la revue *Canadian Journal of Earth Sciences*, *« ce sont les juvéniles qui ont éliminé tous les autres »*. Avec pour chaque âge, des proies adaptées à leur taille.

L'étude des jeunes *T. rex* a aussi permis de trancher un débat : non, une version lilliputienne du « roi des lézards tyrans » n'a pas vécu à la fin de l'ère des dinosaures. Deux spécimens extraits

AKG IMAGES

COMPORTEMENT

Un animal social

De nombreux nouveaux indices indiquent que les *T. rex* ne menaient pas une existence solitaire mais au contraire avaient des contacts avec leurs congénères. Les scientifiques se sont intéressés à leurs cousins, *Tarbosaurus,* en Asie, *Albertosaurus et Teratophoneus*, deux tyrannosauridés qui ont vécu quelques millions d'années avant *T. rex* en Amérique du Nord. Des fossiles de ces trois espèces ont été retrouvés formant des « lits d'ossements », des amas qui regroupent les squelettes de plusieurs individus. *« La seule façon pour un groupe d'animaux de la même espèce d'être enterré ainsi, c'est de mourir ensemble, ce qui signifie probablement qu'ils vivaient ensemble. Je pense qu'on peut imaginer* T. rex *et les autres tyrannosaures comme des animaux sociaux. Ils ont sans doute vécu et même chassé en petites meutes »*, confirme Steve Brusatte, paléontologue à l'université d'Édimbourg (Écosse).

du sol de la formation de Hell creek — le ruisseau de l'enfer où le premier spécimen de *T. rex* a été découvert en 1946 — dans le Montana, aux États-Unis, par les équipes du Burpee Museum of Natural History, à Rockford, semblent apporter une réponse définitive. Jane et Petey ont d'abord été suspectés d'appartenir à cette mystérieuse espèce nommée *Nanotyrannus lancensis*. *« Ces fossiles de* T. rex *plus petits que la normale sont très rares mais ils permettent effectivement d'évoquer une version lilliputienne du dinosaure le plus célèbre au monde. C'est une idée attrayante et c'est sans doute pour cela qu'elle résiste depuis si longtemps »*, raconte Holly Woodward, paléontologue à l'université d'État de l'Oklahoma. Tout étant démesuré avec *T. rex*, la petite taille est ici toute relative. Ainsi, Jane et Petey mesurent entre 4 et 6 m de long pour une hauteur de 1,8 à 2,5 m et un poids avoisinant la tonne ! L'idée d'un *T. rex* pygmée s'appuie aussi sur un autre argument : dans un environnement insulaire ou de superficie limitée, telle l'île-continent Laramidia où s'épanouissait *T. rex*, des espèces de dinosaures ont effectivement évolué pour devenir plus petits. C'est le cas, par exemple, des sauropodes européens.

Dans leur étude, publiée en 2020 dans la revue *Science Advances*, Holly Woodward et son équipe ont pu étudier les tibias et les fémurs de Jane et Petey. Les chercheurs ont scruté à fort grossissement l'organisation des fibres osseuses ainsi que d'autres microstructures et comparé leurs images avec celles obtenues sur les os d'espèces modernes. Verdict : *« les caractéristiques de ces os soutiennent que ces petits squelettes sont des juvéniles, des jeunes* T. rex. *Ils ne constituent donc pas une nouvelle espèce. »* Il a même été possible de donner un âge aux deux adolescents. *« Les animaux interrompent chaque année leur croissance et, lorsque cela se produit, des anneaux se forment dans les os, ils ont une apparence similaire aux cernes des arbres. Et nous pouvons compter ces anneaux à l'intérieur de l'os pour calculer l'âge d'un animal »*, détaille Holly Woodward. Ainsi, elle a pu déterminer que Jane avait 13 ans et Petey 15 ans au moment de leur mort.

De la grosse poule au monstre

L'étude du squelette des *T. rex* juvéniles a aussi permis de cerner le profil de croissance de cet animal surdimensionné : *« Même si on n'a encore jamais trouvé d'œufs de* T. rex*, il faut bien se dire qu'ils ne devaient pas être beaucoup plus gros que ceux d'espèces apparentées, soit la taille d'un ballon de basket. Il nous faut comprendre comment on passe d'un animal qui à la naissance a environ la taille d'une grosse poule au monstre qu'il est à l'âge adulte »*, s'interroge Jean Le Loeuff directeur du musée des Dinosaures (Dinosauria) à Espéraza (Aude). Dans les os, l'espacement entre chaque anneau fournit une indication du taux annuel de croissance. Ils sont rapprochés chez Jane et Petey, ce qui signe une croissance régulière. Mais chez d'autres spécimens plus âgés, ils s'espacent après une quinzaine d'années pendant environ cinq ans, période durant laquelle *T. rex* grandit démesurément. Enfin, ils se resserrent quand l'animal atteint sa taille adulte. *« Il faut environ vingt ans au* T. rex *pour grandir, mais la plus grande partie de sa vie, qui est d'une trentaine d'années, il est beaucoup plus petit que sa taille adulte finale »*, souligne Holly Woodward. De quoi apprécier davantage encore la taille démesurée de Trix. ■

POUR EN SAVOIR PLUS

- **Le Triomphe et la chute des dinosaures. La nouvelle histoire d'un monde oublié.** Steve Brusatte, Éd. Quanto, 2021.
- **T. rex superstar. L'irrésistible ascension du roi des dinosaures,** Jean Le Loeuff, Belin, 2016.
- Reconstitution de la marche de Trix : **sciav.fr/896Trix**

HOLLY WOODWARD BALLARD

« Tels les cernes des arbres, des anneaux à l'intérieur des os permettent de calculer exactement l'âge du "T. rex" »

Holly Woodward, paléontologue à l'université d'État de l'Oklahoma, à Stillwater (États-Unis)

REJOIGNEZ **LE PREMIER PÔLE SCIENTIFIQUE** DE LA PRESSE FRANÇAISE

SCIENCES ET AVENIR La Recherche

LE MENSUEL

LE HORS-SÉRIE

UNE INFORMATION THÉMATIQUE CLAIRE ET VIVANTE

Chaque trimestre, une thématique étudiée sous tous ses aspects, en compagnie des plus grands spécialistes.

39 JOURNALISTES PASSIONNÉS

19 PARUTIONS PAR AN

2,5 MILLIONS DE LECTEURS

2,6 MILLIONS DE SOCIO-NAUTES

7,3 MILLIONS DE VISITEURS SUR LE SITE

3 APPLICATIONS IOS/ANDROID

UNE VISION COMPLÈTE DE LA SCIENCE

Chaque mois, toute l'actualité scientifique, dans un langage accessible.

Retrouvez toutes nos offres d'abonnement sur sciencesetavenir.fr

La Recherche

LE TRIMESTRIEL

LA RÉFÉRENCE INCONTOURNABLE

Chaque trimestre, un panorama complet en 150 pages de la recherche scientifique.

Retrouvez toutes nos offres d'abonnement sur larecherche.fr

2 SITES POUR DES INFOS EXCLUSIVES

TOUTE L'ACTUALITE SCIENTIFIQUE QUOTIDIENNE

2 sites au service de l'actualité scientifique, de la plus accessible à la plus innovante. **Des articles quotidiens** pour être à la pointe de la science.

Vos questions en direct aux chercheurs chaque jeudi de 17H30 à 19H sur https://www.twitch.tv/sciencesetavenir/

plus de 2,2 millions de fans !

plus de 160 000 followers

163 000 instagrammeurs

Plus de 7 000 abonnés professionnels

plus de 17 000 abonnés

PROMINT-SCA

Comment « Salammbô » a influencé les archéologues

Le succès du roman « historique » de Gustave Flaubert paru en 1862 a provoqué une ruée archéologique vers Carthage. Pour le meilleur comme pour le pire, ainsi que le révèle une exposition à l'occasion du bicentenaire de la naissance de l'écrivain.

« *Vers 1820, le consul du Danemark en Tunisie, Christian Tuxen Falbe, est l'un des premiers à fouiller Carthage en procédant à de vrais relevés de terrain. Cartographe de formation, il dessine le plan de la ville et les implantations hypothétiques des remparts, de monuments…* » Si l'historienne et archéologue Myriame Morel-Deledalle rappelle cet épisode c'est qu'il remet en contexte les matériaux qui ont nourri l'imagination de l'écrivain français Gustave Flaubert, contribuant au succès de son roman *Salammbô*. « *Une sorte d'opéra en prose* » selon la formule de Maupassant, qui servira la cause scientifique. Mais qu'est-ce que *Salammbô* ? L'affrontement, deux siècles et demi avant notre ère, entre Carthage et les mercenaires que la cité punique avait employés, puis trahis, dans sa guerre contre Rome… L'histoire d'amour entre l'un de ces mercenaires, le Libyen Mathô, et la princesse Salammbô… Un « opéra » qui éclabousse de couleurs, retentit du choc des glaives, enivre des senteurs de l'encens des temples et de l'arôme des festins de la Tunisie antique.

Succès de librairie dès sa sortie en 1862, le livre fait l'objet d'une exposition-événement pour le bicentenaire de la naissance de Flaubert, « Salammbô. Fureur ! Passion ! Éléphants ! » Présentée entre avril et septembre au musée des Beaux-Arts de Rouen, elle sera visible au Mucem à Marseille à compter du 20 octobre avant de s'envoler pour le musée national du Bardo à Tunis (Tunisie). On y découvre 350 dessins, sculptures, peintures inspirées par le roman. Qui sont autant de témoignages sur la méthode de travail de l'écrivain normand, lequel avait constitué une vraie bibliographie scientifique. « *Savez-vous combien maintenant je me suis ingurgité de volumes sur Carthage ? Environ 100 !* » écrit-il à son ami Jules Duplan dès 1857. « *Une source essentielle de Flaubert pour camper le cadre historique de son livre est le Grec Polybe,* explique Sylvain Amic, co-commissaire de l'exposition et directeur de la Réunion des musées métropolitains de Rouen. *Cet historien est un témoin direct de la destruction de Carthage, puisqu'il a participé au sac de la ville par l'armée du général romain Scipion Émilien, en 146 avant J.-C.* » La cité punique, après sept siècles d'existence, fut littéralement rasée.

E. LESSING/ AKG IMAGES - HERVE MERLIAC/LEEMAGE

▲ **La figure d'Héraclès** sur cette monnaie punique de Sicile a servi de modèle à Flaubert pour la coiffure du personnage de Mathô.

◀ **Cette stèle dédiée à la déesse punique Tanit** provient du Tophet de Carthage, lieu supposé de sacrifices humains, découvert en 1921, 60 ans après la publication de « Salammbô ».

Au XIXe siècle, le site est devenu une carrière

D'ailleurs au XIXe siècle il ne reste rien du joyau tunisien. Le site a été rendu à l'état sauvage ; c'est une carrière où, depuis le Moyen Âge, les bâtisseurs se servent en pierres de construction. Quant aux objets archéologiques, témoignages de l'Orient antique, peu sont disponibles. Il y a bien les pièces de monnaie, retrouvées dans le bassin méditerranéen, qui signent les échanges commerciaux. D'où la fréquentation assidue du Cabinet des médailles de la Bibliothèque nationale par Flaubert pour s'inspirer de leur iconographie. Tel ce tétradrachme punique de Sicile montrant Héraclès la tête couverte d'un capuchon en peau de

DREUX, MUSÉE D'ART ET D'HISTOIRE MARCEL DESSAL

Le personnage de la princesse Salammbô a a inspiré de nombreux artistes (ici, une peinture de Georges-Antoine Rochegrosse, 1895).

lion : une coiffure dont se couvre Mathô dans le livre pour se préparer au combat.

L'engouement pour *Salammbô* agit comme un accélérateur de savoir en provoquant une ruée archéologique vers Carthage. « *Les fouilles du père Delattre, juste après Flaubert, sont les premières à exhumer des objets très significatifs, comme le sarcophage de la prêtresse ailée, du mobilier funéraire, des objets de parure* », reprend Sylvain Amic… Mais l'influence du livre sur les scientifiques a aussi connu des excès. « *L'histoire de* Salammbô *est tellement présente dans les esprits qu'on a l'impression que Flaubert va ensuite polluer le raisonnement archéologique* », confirme Sylvain Amic. Le mécanisme est manifeste lorsque est découverte en 1921 une zone qui révèle de nombreuses urnes remplies d'ossements d'enfants. Or le roman comporte un chapitre mémorable où les Carthaginois offrent leurs jeunes en sacrifice au dieu Moloch, sur un lieu que Flaubert, en référence à la Bible, baptise le « Tophet ». « *Ce mot hébreu désigne un endroit où l'on procède à des sacrifices d'être vivants en offrande aux divinités,* explique Myriame Morel-Deledalle, également co-commissaire de l'exposition et conservatrice en chef au Mucem (Marseille). *Des animaux pouvaient être égorgés, mais rien n'indique que des enfants aient aussi été tués.* » D'ailleurs nulle source historique contemporaine n'indique de pareils massacres de jeunes gens dans la Carthage punique : leur description dans *Salammbô* est une invention littéraire. « *Pourtant avec cette découverte de restes d'enfants, les spécialistes se sont dit : "Voilà le Tophet dont parlait Flaubert"* », explique l'archéologue tunisien Ahmed Ferjaoui, chercheur à l'Institut national du patrimoine de Tunisie. « *Le poids littéraire a imprimé un diktat scientifique — auquel ont cédé des archéologues patentés — sur un site que Flaubert n'a même pas vu* », confirme Myriame Morel-Deledalle : pour préparer son livre, l'écrivain a en

Gustave Flaubert (1821-1880).

AKG IMAGES

ÉPIGRAPHIE

Le mystère du « Tarif de Marseille »

Cette pierre du IVe siècle avant notre ère porte *« une inscription punique trouvée non pas à Carthage mais à Marseille!* explique l'archéologue Ahmed Ferjaoui. *On ignore comment elle s'est retrouvée de l'autre côté de la Méditerranée.* » Hypothèse vraisemblable : elle aurait voyagé par bateau comme lest : *« À l'aller, le navire transporte un chargement qu'il n'a plus au retour. Pour équilibrer le bateau, on y met des pierres ramassées de-ci, de-là, qui à l'arrivée sont abandonnées* », explique l'historienne Myriame Morel-Deledalle. Découvert en 1845 dans les fondations d'une maison, le Tarif de Marseille devait orner un temple en l'honneur de Bâal-Saphon, divinité du vent, de la mer et de la tempête. L'inscription fixe les modalités des offrandes aux dieux : pour ceci, vous devez égorger une chèvre, pour cela, c'est un sacrifice d'oiseau ou un don de parfum… Le Tarif donne le coût de chaque opération et les taxes appliquées au bénéfice des prêtres. *« Tout est tarifé et codifié pour qu'il y ait la même règle pour tous* », commente Myriame Morel-Deledalle. Dans sa correspondance, Flaubert évoque la pierre comme l'une de ses sources de documentation : *« Pour lui c'est une base à partir de laquelle il peut faire fonctionner son imagination* », ajoute le directeur des Musées de Rouen, Sylvain Amic. Voilà tout le projet de Flaubert : écrire un livre qui fasse « vrai ». Mais pas un roman historique.

VILLE DE MARSEILLE/RMN GRAND-PALAIS/CLAUDE ALMODOVAR/MICHEL VIALLE

La pierre retrouvée à Marseille proviendrait d'un temple de Carthage. Son inscription punique indique la liste des offrandes à faire aux dieux et leur coût.

effet voyagé en Tunisie en 1858… soit plus de 60 ans avant les fouilles du site du Tophet!

Rien n'indique que des enfants aient bien été exécutés à cet endroit, peut-être s'agit-il d'un cimetière où reposent des jeunes disparus de mort naturelle ? L'analyse scientifique des fragments de squelettes *« a d'ailleurs montré qu'il y avait là un large pourcentage d'enfants décédés très jeunes, parfois même 3 à 4 mois avant le terme* », relève Ahmed Farjaoui : si les petits sont morts avant la naissance, c'est qu'ils n'ont pas été sacrifiés… Cette remise en question de la nature du Tophet de Carthage sera tardive ; elle intervient seulement dans les années 1980 avec les travaux de deux archéologues, d'abord la Française Hélène Benichou-Sajar puis l'Italien Sabatino Moscati. *« Il faut nuancer toutes les analyses faites dans le cadre de ce débat scientifique* », tempère Myriame Morel-Deledalle. Car les fameuses urnes funéraires contiennent aussi des ossements d'animaux, ce qui plaide plutôt pour la pratique des sacrifices : *« Sur la durée d'existence de la Carthage punique, près de sept siècles, plusieurs pratiques religieuses ont pu se succéder sur un même lieu.* »

D'autant plus qu'à la science et à la littérature est venue se heurter une troisième force : la politique! Après que la Tunisie est devenue indépendante en 1956, le gouvernement a revalorisé le monde punique pour montrer qu'aux origines du pays il y avait une civilisation exemplaire, qui n'avait rien à envier à l'Europe. Évidemment, une pratique barbare comme le sacrifice des enfants n'y avait pas sa place… Résultat ? Aujourd'hui encore, la nature réelle du Tophet de Carthage interroge. Comme demeure, 200 ans après la naissance de Flaubert, le charme de *Salammbô*. ■

Olivier Lascar
@olascar

À VOIR

Salammbô, Passion! Fureur! Éléphants! — Du roman culte à l'exposition
Mucem, 1 Esp. J4, Marseille. Du mercredi 20 octobre au lundi 7 février 2022. Rens. : **sciav.fr/896Salammbo**

YVES INCHIERMAN

« Le poids littéraire a imprimé le diktat scientifique auquel ont cédé des archéologues patentés »

Myriame Morel-Deledalle, conservatrice en chef au Mucem (Marseille), co-commissaire de l'exposition

148 pages
MAGAZINE-LIVRE
Trimestriel

Chez votre marchand de journaux et chez votre libraire

32 SCIENTIFIQUES
ONT PARTICIPÉ À CE NUMÉRO

La Recherche
LE MAGAZINE DE RÉFÉRENCE SCIENTIFIQUE

PATRICK KOVARIK / AFP

BRUNO DAVID

PALÉONTOLOGUE ET BIOLOGISTE, PRÉSIDENT DU MUSÉUM NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE (MNHN) DE PARIS

« Une biodiversité riche protège des pandémies »

Le président du MNHN Bruno David alerte sur la double crise de la biodiversité et du changement climatique. Il propose des pistes de solutions bénéficiant au vivant tout en agissant positivement sur le climat.

SOMMAIRE
Entretien p. 86
Chroniques p. 90
Livres p. 92
C'est à voir p. 94
Le ciel du mois p. 95
Questions de lecteurs p. 96
Solutions des jeux p. 97
Jeux p. 98

Les spécialistes du climat et ceux de la biodiversité travaillaient séparément. Les deux thématiques ne sont-elles pas liées ?

Bruno David : Dans le fonctionnement de la planète, il existe de multiples interactions entre le climat et la biodiversité. Lorsque vous êtes face aux falaises du Vercors ou aux falaises de craie de Normandie, vous êtes face à de la biodiversité : ces falaises résultent de la vie microscopique qui s'est déposée au fond des océans, a sédimenté et s'est fossilisée. Et vous êtes aussi devant un puits de CO_2, puisque les sédiments carbonatés contribuent à piéger du CO_2 de l'atmosphère. Autrement dit, ces falaises illustrent un lien — très ancien — entre climat et biodiversité !

Il faut donc considérer les deux crises ensemble et y répondre par des solutions communes ?

Tout à fait. Le problème climatique vient essentiellement du fait que l'on produit trop de CO_2 et de méthane *(lire aussi p. 52)*. Du coup, on réfléchit à la manière de repiéger ces gaz. Or, le vivant sait très bien faire cela, mais il faut lui donner un peu de temps. En préservant certains environnements, les forêts, les zones humides, les tourbières par exemple, on facilite le piégeage du carbone qui ne sera relargué que dans un avenir lointain. C'est le cas du charbon et du pétrole. De la végétation ancienne — de la macrovégétation pour le charbon et du plancton océanique pour le pétrole — a transformé par photosynthèse l'énergie solaire en matière organique. Au cours du temps, cette matière organique s'est retrouvée fossilisée, enfouie au fond de la mer ou dans des lacs. Ce processus a participé à piéger du CO_2 et donc à refroidir la Terre à cette époque, il y a des dizaines, voire des centaines de millions d'années. De combien, c'est difficile

En éradiquant de plus en plus les espèces sauvages (ici deux coqs-de-roche au Pérou), l'humain devient une cible pour les pathogènes.

NICOLAS QUENDEZ / NATURIMAGES

à dire, mais en tout cas l'équilibre climatique de la Terre n'aurait pas été le même s'il n'y avait pas eu ces phénomènes.

En juin, le Giec et l'Ipbes* ont publié un rapport conjoint préconisant des mesures de préservation de la biodiversité qui ont une interaction positive sur le climat. Quelles sont-elles ?

J'ai déjà mentionné la préservation des environnements facilitant le piégeage de carbone. De manière générale, les actions visant à protéger, à gérer durablement et à restaurer les écosystèmes naturels, et qui permettant en même temps de contribuer à l'atténuation du changement climatique, sont ce que l'on nomme des solutions fondées sur la nature. Elles peuvent jouer un rôle dans l'atténuation du changement climatique. Toutefois, leurs effets ne seront sensibles qu'à long terme. Elles peuvent néanmoins faire débat et elles ne seront efficaces qu'avec des réductions ambitieuses de toutes les émissions de gaz à effet de serre d'origine humaine.

Quelle est la nature du débat ?

Les systèmes sont complexes avec beaucoup de paramètres à prendre en compte. Prenons les forêts. L'analyse de leur rôle de régulation n'est pas toujours facile à évaluer. Par exemple, une publication avait fait grand bruit en 2019 en prétendant que replanter 1000 milliards d'arbres serait une solution pour répondre au changement climatique, car ils absorberaient le CO_2 grâce à la photosynthèse. Or un groupe de scientifiques internationaux avait remis en cause ce travail, notant que la capacité de capture du CO_2 avancée dans l'article initial était exagérée d'un facteur cinq. De surcroît, planter des arbres au mauvais endroit peut détruire certains écosystèmes. On évalue aussi le rôle du plancton océanique, si important pour la production

d'oxygène de notre planète. Mais le plancton joue également sur la formation des nuages, ce qui est moins connu. Il produit en permanence une petite molécule nommée sulfure de diméthyle (DMS). Très volatile, elle va se retrouver dans l'atmosphère au-dessus de l'océan et agir comme point d'ancrage à la vapeur d'eau pour former des gouttelettes — c'est le phénomène physique de nucléation. Quand il fait très beau, le plancton prolifère et produit beaucoup de DMS, ce qui va permettre à la grande quantité de vapeur d'eau qui s'évapore — puisqu'il fait chaud — de s'accrocher à ces molécules de sorte qu'il va se former beaucoup de nuages. Et lorsqu'il fait moins beau, il y aura moins de plancton, moins de DMS, et donc moins de nuages et il va refaire beau. Ainsi, un cycle vertueux s'installe, lié au plancton et surtout au phytoplancton, qui participe sans qu'on le sache à la nébulosité sur Terre.

Pourquoi est-il si important de préserver la diversité du vivant ?

Les espèces animales nous rendent service dans le sens où elles participent à l'équilibre de la planète, à faire en sorte que tout fonctionne. Cet équilibre est ce qu'il est, mais on le connaît, nos sociétés y sont adaptées. Si le système planétaire basculait vers un nouvel équilibre inconnu serait-il déstabilisant, intéressant, neutre ? Nul ne peut vraiment savoir, mais la probabilité qu'il soit déstabilisant pour nos sociétés est très forte. L'exemple du moment est la pandémie.

La perte de la biodiversité est donc aussi un problème sanitaire ?

Oui, c'est parce que nous sommes de plus en plus nombreux et que l'on éradique de plus en plus les espèces sauvages. Et plus on éradiquera les autres, plus on se présentera comme une cible pour les pathogènes. Le maintien d'une biodiversité riche est le meilleur moyen d'éviter des pandémies à l'avenir. Le corollaire est aussi qu'il faut éviter d'aller au contact des espèces sauvages, car si nous les fréquentons d'un peu trop près, les pathogènes peuvent passer de ces espèces à l'humain, contribuant à l'émergence de zoonoses.

Deux grands rendez-vous se profilent : la COP26 sur le climat à Glasgow (Écosse) en novembre, et en 2022 la COP15 sur la biodiversité en Chine. Qu'attendez-vous de ces rencontres ?

J'attends de la COP15 sur la biodiversité, qui aura lieu au printemps 2022, qu'elle ait un impact aussi important dans les esprits que la COP21 qui a eu lieu à Paris en 2015 et qui a vu la signature de l'accord de Paris. Même si l'on peut regretter que les termes de l'accord ne soient pas suffisamment appliqués et qu'il y ait eu des retournements — les États-Unis en étaient partis avant d'y revenir — ou que les actions ne suivent pas assez vite. L'accord de Paris constitue une vraie référence, une balise a été posée. J'espère que les prochaines COP marqueront de tels jalons, également pour le sujet de la biodiversité. Il faut que l'on arrive à comprendre que tout est lié, qu'il n'y a pas de hiérarchie entre des causes à défendre. Ce sont des sujets environnementaux au sens large que l'on ne peut pas traiter indépendamment.

J-F PAGA/OPALE VIA LEEMAGE

« Si le système planétaire basculait vers un nouvel équilibre inconnu, la probabilité qu'il soit déstabilisant pour nos sociétés est très forte. L'exemple du moment est la pandémie »

Finalement, êtes-vous plutôt optimiste ou pessimiste ?

Cela dépend de ce que j'entends le matin à la radio… Il ne faut pas être trop pessimiste. Car si nous le sommes trop, cela a déjà été dit par des psychologues, cela freine l'action. Il ne faut pas non plus être dans un optimisme béat. Pour la biodiversité, sous réserve que nous agissions, j'ai plutôt tendance à être un peu optimiste, car elle a une très forte capacité de réaction ; son potentiel de cicatrisation est réel.

Pour le climat, je suis plus pessimiste, car il y a une telle inertie dans un système qui est global qu'il est beaucoup plus difficile d'inverser les tendances. Les actions nécessaires se mesurent à l'échelle de la planète et il faudra attendre des décennies avant d'en voir les résultats. Paradoxalement, même si le système climatique est globalement bien plus simple que celui de la vie, l'action se révèle plus difficile et moins gratifiante à court terme et localement. ■ **Propos recueillis par Philippe Pajot** @ philpaj

* Giec : Groupe d'experts intergouvernemental pour le climat. Ipbes : Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques.

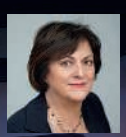
POUR EN SAVOIR PLUS

Retrouvez Bruno David dans le trimestriel de *La Recherche* (n° 567) dont le dossier principal est consacré à la thématique de la biodiversité et du climat. Ces deux crises sont au cœur des défis actuels pour la préservation des écosystèmes et des sociétés humaines. Un bilan de la situation dressé par les chercheurs, ainsi que des préconisations de solutions, notamment celles qui sont fondées sur la nature. À retrouver aussi dans ce numéro : un entretien avec l'anthropologue Philippe Descola, ainsi que des articles sur les vaccins ARN, la détection des ondes gravitationnelles, la physico-chimie de la cuisine.

ÉVÉNEMENT 2021
EXPOSITION UNIVERSELLE DUBAI

Sciences et Avenir vous convie à une croisière unique, à l'occasion de l'exposition universelle de 2021 à Dubaï.

L'événement promet en effet d'être sans précédent, et pas seulement parce qu'il s'agit d'une première dans la région Moyen-Orient, Afrique, où 180 pays se retrouveront ainsi rassemblés. Son thème, qui appelle à **« Construire le futur »** est en parfaite résonance avec la ligne éditoriale de Sciences et Avenir. Il projette en effet dans l'avenir, avec toutes les interrogations majeures du présent : quelles sciences (climatologie, génétique, intelligence artificielle...) pour assurer une économie et une société durables ? Quelles nouvelles technologies pour la mobilité, entre avions, fusées mais aussi trottinettes ! Quelles opportunités nouvelles voyons-nous surgir ? Notre futur promet d'être, en effet, celui que nous voulons bâtir, fort de nos héritages, mais aussi en phase avec la modernité. Ici, l'invitation à « connecter les esprits ». Ces promesses d'avancées, nous les analyserons avec des scientifiques, des économistes, des spécialistes de géopolitique et de nouvelles technologies, de très haut niveau. Et ce, lors d'une croisière étonnante, faisant étape à Dubaï et au Pavillon Français de l'Exposition Universelle, mais aussi à Abu Dhabi et son musée du Louvre, ou encore en visitant la Rose des Sables, musée du Qatar à Doha... Des découvertes et des rencontres passionnantes en perspective.



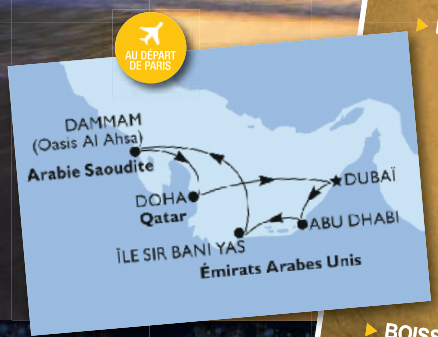
Dominique LEGLU
Directrice éditoriale

SCIENCES ET AVENIR

Challenges

CROISIÈRE
LA MAGIE DES EMIRATS

10 JOURS / 7 NUITS
DU 03 AU 12 DEC. 2021
A BORD DU MSC VIRTUOSA



- 2 JOURS À L'EXPOSITION UNIVERSELLE DE DUBAI
- ENTRÉES FAST TRACK
- VISITE DU PAVILLON FRANÇAIS
  Conférence et cocktail dînatoire
- EXCLUSIVITÉ : L'ARCHITECTOURS À DUBAI ET ABU DHABI.
- VISITE GUIDÉE MUSÉE DU LOUVRE ABU DHABI
- VISITE DE LA MOSQUÉE D'ABU DHABI
- VISITE DU PALAIS PRÉSIDENTIEL À ABU DHABI
- VISITE DU MUSÉE LA ROSE DES VENTS À DOHA
- VISITE DE LA BURJ EL KHALIFA
  LA TOUR LA PLUS HAUTE DU MONDE À DUBAI
- POUR LA PREMIÈRE FOIS, UNE ESCALE
  EN ARABIE SAOUDITE AUX PORTES
  DE LA PLUS GRANDE OASIS AU MONDE.
- BOISSONS À TABLE INCLUSES ET FORFAIT SÉJOUR À BORD

À PARTIR DE
2 790 €/PERS.
Au départ de Paris - En tout inclus

AVEC VOUS À BORD !
Les conférenciers

Mikaa MERED
Professeur de géopolitique, observateur et analyste des Emirats Arabes, spécialiste des pôles et de l'hydrogène.

Marie-Christine de WARENGHIEN
Incontournable pour les architectours à Dubai & Abu Dhabi.

Jean-François CLERVOY
Astronaute français.
Président de Novespace, filiale du Centre national d'Etudes spatiales (CNES).

RENSEIGNEMENTS ET RÉSERVATIONS :
BLEU VOYAGES
voyager@bleu-voyages.fr
TÉL. 04 72 76 75 66
www.expo2021.fr

Selectour Bleu Voyages

MSC CROISIÈRES Emirates

Neige et Soleil Voyages SAS au capital de 396 800 € • RC Bourgoin Jallieu B 398 629 766 • Code APE 7911 Z • Immatriculation Atout France 038110038 • Agence garantie par l'APST • 15 Avenue Carnot - 75017 Paris • Agence assurée pour sa responsabilité civile et professionnelle par le groupe MMA Entreprises n° de contrat 144569079.

Graph: www.pascalem.com - Crédits photos : Expo 2020 Dubai et Pixabay CCO

Directeur de recherche au CNRS, auteur principal du 6e rapport du Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), groupe 1.

Chronique coécrite avec Céline Guivarch Directrice de recherche à l'École des ponts, auteure principale du 6e rapport du Giec, groupe 3.

UNIVERSCIENCE

CLIMAT PAR CHRISTOPHE CASSOU

Un voyage sans retour, en territoire inconnu

C'est dans un contexte climatique d'événements extrêmes sidérants que le 9 août, les représentants des gouvernements du monde entier ont approuvé le résumé à l'intention des décideurs du premier volet du 6e rapport du Giec, le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, qui porte sur les bases physiques du climat. Les conclusions sont sans ambiguïté ; elles rendent irresponsables tout retard dans l'action pour limiter un changement climatique qui est désormais généralisé et qui s'aggrave. Une seule solution réaffirmée dans le rapport : la neutralité carbone. Chaque tonne de CO_2 supplémentaire dans l'atmosphère augmente le réchauffement et ses conséquences. Chaque fraction de température supplémentaire se traduit en risque additionnel en matière d'événements extrêmes, en franchissement de seuil de tolérance pour l'humain et les écosystèmes. Sans action immédiate, forte, soutenue dans le temps et à grande échelle, les seuils de 1,5° C ou 2° C seront hors de portée.
Une bonne nouvelle dans ce rapport : même si certains changements sont irréversibles (acidification et perte d'oxygène de l'océan, fonte des calottes, etc.), le système climatique est plus réactif qu'on ne l'avait estimé, et certaines actions, en particulier sur le méthane (gaz à effet de serre puissant), auraient déjà des effets discernables dans dix à vingt ans, avec des cobénéfices sur la qualité de l'air et la santé.
Ce rapport est un rappel à la réalité, une claque, un coup de semonce. ■

Directrice de recherche au CNRS, Institut de recherche en informatique fondamentale (CNRS/ université de Paris)

CLAIRE MATHIEU

MATHÉMATIQUES PAR CLAIRE MATHIEU

De l'importance de vérifier ses calculs

Il est une recommandation qui, sous une apparence bénigne, cache des méthodes sophistiquées : vérifier ses calculs. Cela peut vouloir dire refaire le calcul : le risque d'erreur diminue mais le temps de calcul est doublé.
Cela peut vouloir dire aussi faire une preuve par neuf pour une multiplication, ou une analyse dimensionnelle en physique. La vérification étant plus simple que le calcul, on peut la supposer rapide et sans erreur, mais elle n'est que partielle : une discordance révèle une erreur, mais la concordance des résultats ne signifie pas que le calcul soit correct.
Cela peut vouloir dire faire une multiplication b x c = a pour vérifier une division a/b = c, ou encore vérifier qu'après le tri d'une liste ses éléments sont bien dans l'ordre croissant. Alors la vérification est rapide mais aussi complète : elle démontre que le calcul est correct.
On peut aller plus loin. Ainsi, pour vérifier le produit de deux matrices AB = C, une méthode rapide consiste à prendre un vecteur x au hasard, à calculer Bx = y puis Ay = z et à vérifier que cela coïncide avec Cz. Si C diffère de AB, pour un vecteur x aléatoire le résultat permet presque sûrement de le détecter. Il s'agit donc là d'une méthode probabiliste efficace.
De même en programmation : il est souhaitable de faire suivre un calcul complexe par une procédure simple et rapide de vérification. L'étape de vérification fait intégralement partie d'un calcul bien mené et devrait être systématiquement enseignée à tous les niveaux de l'enseignement. ■

ÉTHIQUE PAR JEAN-GABRIEL GANASCIA

Discrimination, vaccination et passe sanitaire

Professeur à Sorbonne Université, à Paris, chercheur en intelligence artificielle au LIP6 (Sorbonne Université, CNRS), ex-président du comité d'éthique du CNRS. Dernier ouvrage publié : *Le Mythe de la singularité. Faut-il craindre l'intelligence artificielle ?* Le Seuil, 2017.

BRUNO LÉVY

Déclarations des droits humains, chartes et codes d'éthique de tous ordres condamnent la discrimination et recommandent un traitement équitable de chacun, indépendamment de sa race, sa couleur, son ascendance, son genre, sa religion, ses handicaps, etc. Comment y contrevenir ? Aujourd'hui, certains réprouvent le principe du passe sanitaire au motif qu'il conduirait à traiter différemment les vaccinés des autres. Doit-on les suivre au nom de la proscription de la discrimination ?

Pour répondre à cette question, revenons sur le sens des mots : discriminer vient du latin *discriminare* qui signifie « séparer », « distinguer ». La discrimination résulterait donc d'un traitement différencié selon des catégories prédéterminées.

Il existe pourtant des situations où l'emploi de critères de tri donnés a priori n'apparaît pas choquant. Ainsi, personne ne s'offusque de la nécessité d'avoir un diplôme de docteur en médecine pour soigner. La discrimination vient ici de mesures protectionnistes qui font que seuls les diplômes de quelques pays soient reconnus pour exercer en France.

On condamne la discrimination lorsqu'elle tient à des traits dont la personne n'est pas responsable, comme son genre ou ses origines. Mais, est-ce bien vrai ?

Ainsi, supposons qu'on recherche un mannequin pour essayer des soutiens-gorge : devrait-on s'offusquer de l'élimination systématique des candidats masculins ? L'exemple prête à sourire ; néanmoins, il illustre bien les difficultés à circonscrire la discrimination, sans compter que les progrès de l'endocrinologie pourraient compliquer le problème.

Toujours est-il que la vaccination étant libre et gratuite, elle dépend uniquement du choix de la personne ; il apparaît donc difficile de condamner le passe sanitaire au seul motif de la discrimination qu'il induit. ■

L'ŒIL DE LASCAR

Jeff Bezos veut la Lune. Pour cela, il est prêt à faire un procès à la Nasa. Ce que reproche le milliardaire à l'agence spatiale américaine, c'est d'avoir préféré à sa société d'accès à l'espace Blue Origin celle dirigée par Elon Musk. Conséquence de cette action judiciaire : la Nasa a annoncé le gel du développement de l'atterrisseur jusqu'au 1er novembre. **O. L.**

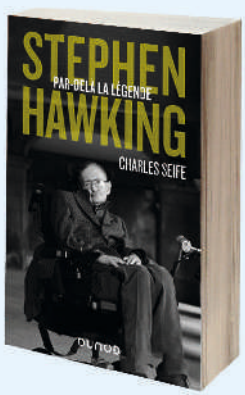
STEVEN PASTON/ ACTION IMAGES/ REUTERS

Stephen Hawking avait participé à la cérémonie d'ouverture des jeux Paralympiques en 2012 à Londres.

Vie et légende de Stephen Hawking

Le journaliste Charles Seife publie un livre d'enquête et de témoignages sur le plus célèbre des astrophysiciens, aussi connu pour ses recherches que pour ses talents de vulgarisateur et disparu en 2018, à l'âge de 76 ans.

BRIO Astrophysicien reconnu devenu une célébrité mondiale, le Britannique Stephen Hawking fascinait. Fascination en raison de ses travaux fondamentaux en cosmologie questionnant l'origine de l'Univers ou les trous noirs mais aussi en raison du brio avec lequel il vulgarisait ces sujets. Certes sa maladie, contractée durant ses études, qui le clouait dans un fauteuil et l'obligeait à s'exprimer à travers une voix métallique de synthèse était pour beaucoup dans sa célébrité. Et il en jouait, son personnage apparaissant dans plusieurs séries et dessins animés, jusqu'à un biopic qui lui a été consacré en 2014, *Une Merveilleuse Histoire du temps*. L'auteur a choisi de dérouler son histoire à rebours, de sa mort à sa naissance. Un choix inhabituel mais dont la narration fonctionne. Enterré à l'abbaye de Westminster, aux côtés d'Isaac Newton, Stephen Hawking a souvent été comparé à son illustre prédécesseur et à Albert Einstein. La pertinence de cette comparaison est sans doute exagérée, mais la ferveur qu'il suscitait — ses livres de vulgarisation sont des best-sellers et chacune de ses conférences était donnée à guichets fermés — était indéniable. L'ouvrage mêle habilement travaux scientifiques et vie privée avec des multiples anecdotes qui changent la vision que l'on pouvait avoir d'un génie solitaire sur son fauteuil roulant, muré dans sa maladie. L'image qui en ressort est celle d'un scientifique certes remarquable mais à l'humour puissant et profondément humain dans une quête sans fin. *« Mon but est simple : accéder à une compréhension complète de l'Univers, comprendre pourquoi il est tel qui l'est et pourquoi il existe »*, répétait-il très souvent. Si vous voulez en savoir plus sur ce personnage singulier mais aussi sur les arcanes de la relativité générale — l'ombre d'Einstein plane en permanence — ce livre est pour vous. ■ **Philippe Pajot**



Stephen Hawking, par-delà la légende, Charles Seife, Dunod, 512 p., 24,90 €

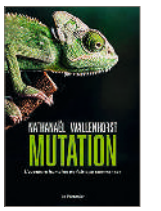
Climat : ici et maintenant

BD Un tandem déterminé, le dessinateur Étienne Lécroart, (membre de l'Oulipo) et le mathématicien Ivar Ekeland, (qui a donné son nom à un théorème) s'attaquent aux causes historiques, économiques, biologiques et physiques du dérèglement climatique. C'est fouillé comme un rapport du Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), mais beaucoup plus drôle avec des croquis qui évoquent Les *Dingodossiers* de Gotlib et Goscinny et des répliques qui assassinent sceptiques, cyniques et attentistes. La dépression n'est pas une option, pour les auteurs et l'espoir réside dans des alternatives au laisser-faire et aux mesurettes. À condition d'agir vite. ■ **R. M.**

Urgence climatique, il est encore temps !, Etienne Lécroart, Ivar Ekeland, Casterman, 120 p., 19 €

Un nouveau contrat social

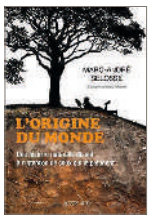
MUTATION Les partisans du transhumanisme qui refusent la mort et le déterminisme biologique minimisent la véritable mutation en cours, celle de la planète, pointe Nathanaël Wallenhorst, docteur en science politique et de l'environnement. Notre sauvegarde ne passera que par de nouvelles règles de coexistence, entre humains et non humains, bref, elle sera politique explique-t-il, fustigeant notre soif de domination et de possession. Au passage, il décortique les neuf manifestes les plus importants de ce début de siècle, qu'il s'agisse d'économistes atterrés, d'écologie intégrale, de droits des animaux. ■ **R. M.**



Mutation, Nathanaël Wallenhorst, Le Pommier, 268 p., 18 €

De l'or sous nos pieds

PATRIMOINE Ce livre est une invitation à chausser ses bottes pour arpenter les sols des sous-bois et des prés, à se pencher, gratter et observer !

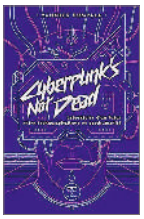


Marc-André Selosse, biologiste, professeur au Muséum national d'histoire naturelle, convoque les connaissances issues de la chimie, la biologie et la physique pour nous faire apprécier les composants du sol, les mécanismes qui font sa richesse et son dynamisme. Il nous appelle à en prendre soin. *« Le sol est un patrimoine,* insiste l'auteur, *il n'est aucun de nos aliments, terrestres ou aquatiques, que nous ne lui devions ! »* ■ **M. G.**

L'Origine du monde, une histoire naturelle du sol à l'intention de ceux qui le piétinent, Marc-André Selosse, Actes Sud, 469 p., 24 €

Tout savoir sur le cyberpunk

HYBRIDATION *« Le ciel au-dessus du port avait la couleur d'une télévision allumée sur une chaîne défunte. »* L'*incipit* de *Neuromancien*, livre de William Gibson de 1984 délivre le programme du genre : la fusion du naturel avec la technologie. Le cyberpunk, c'est *« la rencontre des corps et des techniques : électrodes, puces crâniennes, branchements corporels »*, écrit Yannick Rumpala, de l'université de Nice. Un projet d'hybridation toujours valable, à l'heure où Elon Musk rêve de l'interface humain-machine avec un ordinateur connecté au cerveau. ■ **O. L.**



Cyberpunk's not dead, Yannick Rumpala, éditions Le Bélial, 251 p., 16,90 €

Enquête sur l'avenir de l'humain augmenté

POST-HUMAIN Ex-chercheur en biologie cellulaire et désormais journaliste scientifique collaborant à *Sciences et Avenir-La Recherche,* Nicolas Gutierrez C. signe une enquête au plus près des équipes de recherche qui tentent de réparer, augmenter voire connecter l'humain à la machine. « Cerveau 2.0 », membres bioniques, vieillissement retardé, procréation sans parents, impression 3D d'organes… Aux confins de la science-fiction parfois, c'est un état des lieux des perspectives techniques laissant entrevoir l'avènement d'une « post-humanité ». ■ **H. J.**

Homo machinus, Nicolas Gutierrez C., Vuibert, 272 p., 19,90 €

Notre santé les intéresse

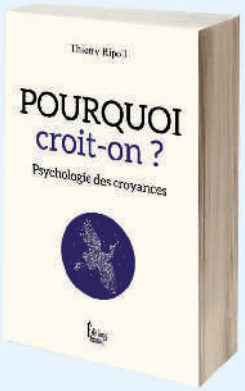
NÉBULEUSE Cliquer sur *« j'accepte les conditions »*, écrire un email au sujet de son mal de dos, envoyer un échantillon d'ADN aux États-Unis pour connaître ses origines : derrière nos actions apparemment anodines se cachent des acteurs multiples, publics et privés, en France et à l'étranger, qui ratissent nos données de santé. Coralie Lemke, journaliste à *Sciences et Avenir-La Recherche*, nous guide dans cet écosystème nébuleux dans lequel les géants du net (GAFAM), les gouvernements, les hôpitaux ou encore les laboratoires pharmaceutiques se disputent l'accès à nos précieuses données de santé, entre besoin de faire avancer la recherche, obligation de protéger les citoyens et appât du gain. ■ **C. G.**

Ma Santé, mes données, Coralie Lemke, Premier Parallèle, 165 p., 17 €

Rétablir l'égalité des chances en science

COMBAT Ayant suivi des filles et des garçons de milieux défavorisés durant quatre ans, la sociologue Clémence Perronnet pointe les déterminants sociaux marquants des inégalités dans les matières scientifiques. Finalement *« les écarts d'intérêts, de goût, d'investissement ou de performance en sciences ne sont ni naturels, ni dus à une méconnaissance ou à un malentendu de la part des populations minoritaires dans le domaine scientifique »*, montre-t-elle. Cette posture de retrait vis-à-vis des sciences peut être combattue sans fatalisme, en tentant de comprendre les phénomènes d'exclusion qui entrent en jeu, par un effort de formation, une action sur les représentations et une pratique active de l'inclusion ainsi que la reconstruction des savoirs. Preuve qu'agir fonctionne : le département d'informatique de l'université Carnegie-Mellon, à Pittsburgh (États-Unis), l'un des meilleurs au monde, a pris le problème à bras-le-corps et frôle les 50 % d'étudiantes depuis près de vingt ans, alors qu'elles n'étaient que 7 % en 1993. Rien n'est inéluctable : il faut juste se donner les moyens. ■ **Ph. P.**

La bosse des maths n'existe pas !, Clémence Perronnet, Autrement, 272 p., 19 €



Ces croyances qui nous gouvernent

PSYCHOLOGIE Même un sceptique radical affiché, n'échappe pas facilement aux croyances et à leurs processus inconscients de formation, explique ici Thierry Ripoll, professeur de psychologie cognitive à l'université d'Aix-Marseille. Il analyse ce phénomène universel au niveau cognitif, psychologique, sociologique et anthropologique. Ainsi, notre intuition, parfois trompeuse, nous bombarde d'hypothèses explicatives sur le monde et notre raison n'agit comme un filtre qu'après coup. Et le système intuitif, ancestral, plus rapide, plus puissant, l'emporte souvent. D'autant que les croyances participent à notre équilibre psychique et forment un rempart contre l'angoisse, en augmentant le sentiment de contrôle. Les rituels ou les prières réduisent le stress. La psychologie sociale et l'anthropologie expliquent de leur côté comment les croyances se répandent dans une communauté jusqu'à s'organiser parfois en système totalitaire. Passionnant et troublant. ■ **Rachel Mulot**

Pourquoi croit-on ?, Thierry Ripoll, Éditions Sciences Humaines, 390 p., 17 €

Chambéry (73)

Eurêka ! Le laboratoire d'Archimède
Cette exposition initie les plus de 7 ans à la fois à diverses notions scientifiques et à la démarche du chercheur : observation, expérimentations, hypothèses. Ateliers et maquettes à manipuler amènent à réfléchir sur la lumière ou l'énergie.
Galerie Eurêka, 150, rue de la République, jusqu'au 17 octobre. Rens. : 04.79.60.04.25.

Les Eyzies (26)

« Homo faber », 2 millions d'années d'histoire de la pierre taillée, de l'Afrique aux portes de l'Europe
Dédiée à « celui qui fabrique », l'exposition présente des outils en pierre de toutes les régions du monde, remontant aux premiers bifaces. Les objets servant à montrer et expliquer les différentes techniques de taille, la sélection des matériaux, etc.
Musée national de préhistoire, 1, rue du Musée, jusqu'au 29 novembre. Rens.: 05.53.06.45.45.

Le Bourget (93)

Voir et observer : l'imagerie spatiale militaire
Films et séries ont popularisé l'observation par satellite à des fins militaires. Les technologies utilisées restent cependant méconnues. Cette exposition s'appuie sur l'expertise du Centre militaire d'observatoire par satellite (CMOS), détaillant la manière dont on obtient une image exploitable.
Musée de l'Air et de l'Espace, 3, esplanade de l'Air et de l'Espace, jusqu'au 7 novembre. Rens. : 01 49.92.70.00.

Lyon (69)

Galerie Émile-Guimet
Sur 400 m², la nouvelle galerie Emile-Guimet — du nom du créateur du musée d'histoire naturelle de Lyon, ancêtre du musée des Confluences — expose des donations récentes en préhistoire, botanique ou faune marine. Chaque vitrine est composée comme un tableau mettant en valeur la beauté des objets.
Musée des Confluences, 86, quai Perrache. Rens. : 04.28.38.12.20.

DASSAULT SYSTÈMES

Équipé de lunettes de réalité virtuelle, le public effectue un parcours immersif dans les 235 mètres de galeries de la célèbre grotte préhistorique.

Paris (75) / Exposition

Grotte de Lascaux 1/1, le jumeau virtuel

Les peintures de Lascaux sont là, sous nos yeux, nous pouvons presque les toucher. Mais en s'approchant, les doigts traversent la paroi de la grotte. C'est qu'il s'agit d'une simulation numérique immersive, proposée par la Cité de l'architecture et du patrimoine, à Paris. À l'aide d'une paire de lunettes et d'un sac à dos bardé d'électronique, le visiteur a l'illusion de s'enfoncer dans la grotte de Lascaux pour admirer plus de 2000 représentations de taureaux, félins, cerfs. Cette expérience est le fruit d'une collaboration entre Dassault Systèmes et la Direction régionale des affaires culturelles de Nouvelle-Aquitaine, dans le but d'offrir un accès inédit à ce site fermé au public depuis 1963. *« Nous envisageons de replacer des objets retrouvés dans la grotte au sein de la réalité virtuelle, afin que le visiteur puisse les manipuler directement dans leur contexte »*, explique la conservatrice de la grotte, Muriel Mauriac. Un essai a déjà été mené avec une petite lampe en grès. (Lire notre reportage sur sciav.fr/896Lascaux) ■ **Samantha Dizier**

Cité de l'architecture et du patrimoine, 1, place du Trocadéro et du 11-Novembre. Rens. : 01.58.51.52.00.

Paris (75)

Renaissances
La Cité des sciences propose au visiteur d'expérimenter un futur proche. Trois parcours imaginent notre environnement de 2023, 2029 et 2045, jouant la carte de l'interactivité pour susciter l'émotion. Mais le tout est étayé et décrypté par les scientifiques. (Lire notre reportage sur sciav.fr/896Renaissances)
Cité des sciences et de l'industrie, 30, avenue Corentin-Cariou, jusqu'en mars 2022. Rens. : 01.85.53.99.74.

Revivre
La Grande Galerie de l'évolution du Muséum national d'histoire naturelle propose de rencontrer des animaux disparus… en réalité augmentée. Équipé de lunettes HoloLens, le visiteur peut admirer et interagir avec 11 spécimens, dont le dodo, le tigre à dents de sabre, la rhytine de Steller ou encore le quagga, recréés avec un réalisme d'un scientifique scrupuleux. (Lire notre reportage sur sciav.fr/896Revivre)
Grande Galerie de l'évolution, 36, rue Geoffroy-Saint-Hilaire. Rens. : 01.40.79.54.79.

Saint-Antoine-l'Abbaye (38)

La forêt, un Moyen Âge enchanté
Fascination, mythes, croyances, peurs… Tout ce qu'a inspiré la forêt aux hommes, du Moyen Âge au XIXe siècle, en occident, compose cette exposition en accès libre. Avec des sculptures, estampes, peintures sur panneaux ou les manuscrits enluminés issus de collections publiques.
Musée de Saint-Antoine-l'Abbaye, le Noviciat, jusqu'au 11 novembre. Rens. : 04.76.36.40.68.

Retrouvez toutes les expositions dans notre guide Internet : **sciav.fr/guideexpos**

PAR JOHAN KIEKEN

Où sont les planètes ?

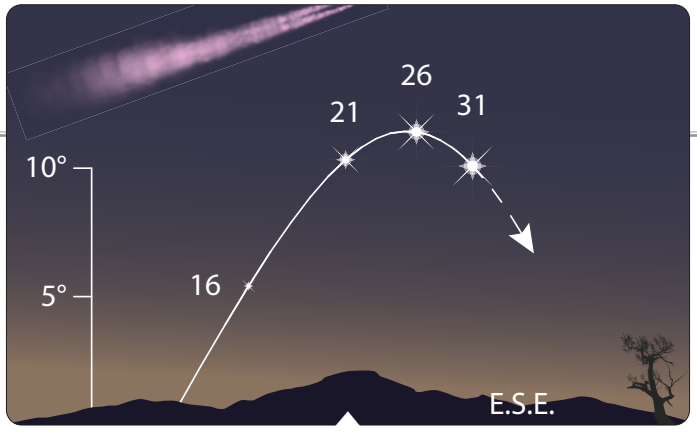
MERCURE La petite planète passe en conjonction inférieure le 9 (elle sera alors entre le Soleil et nous) puis s'écarte de la direction de notre étoile jusqu'à atteindre son élongation maximale occidentale le 25, à plus de 18° de l'astre du jour. La fin du mois est très propice à l'observation matinale de Mercure *(voir ci-contre)*.

VÉNUS L'étoile du Berger atteint sa plus grande distance angulaire (47°) à l'est du Soleil le 29. Toutefois, l'écliptique étant très peu incliné sur l'horizon en soirée sous nos latitudes, elle demeure basse dans le ciel du soir et ne se couche que 2 h environ après le Soleil en fin de mois.

MARS La planète Rouge passe en conjonction avec le Soleil le 8. Elle n'est pas visible en octobre.

JUPITER La planète géante se trouve toujours dans de très bonnes conditions d'observation. Elle se révèle en soirée à une vingtaine de degrés de hauteur vers le sud-est et demeure visible durant une bonne partie de la nuit sous la forme d'un point très brillant, dans une zone où les étoiles sont plutôt ternes.

SATURNE Le lever de la planète aux anneaux précède celui de Jupiter d'environ 45 min. Partez de Jupiter et regarder un peu vers l'ouest (sur votre droite). Voilà Saturne ! Les deux planètes passent le mois dans la constellation du Capricorne.



La scène est représentée une demi-heure avant le lever du Soleil. La position de Mercure est indiquée tous les 5 jours, à partir du 16.

Mercure, « étoile » du matin

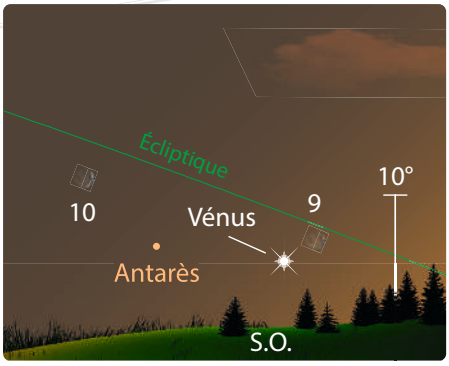
LA PETITE PLANÈTE est beaucoup plus proche du Soleil que ne l'est la Terre. On ne peut donc l'observer que le matin ou en soirée. Les deux dernières semaines du mois sont très favorables à sa détection, en toute fin de nuit et au petit matin vers le levant. Mercure nous présentant une fraction croissante de son hémisphère éclairé par le Soleil au cours du mois, son éclat va grandissant et augmente d'un facteur 9 entre le 16 et le 31.

Notre conseil Il est impératif d'avoir un horizon est-sud-est bien dégagé pour la déceler sur un fond rendu déjà lumineux par le lever imminent du Soleil.

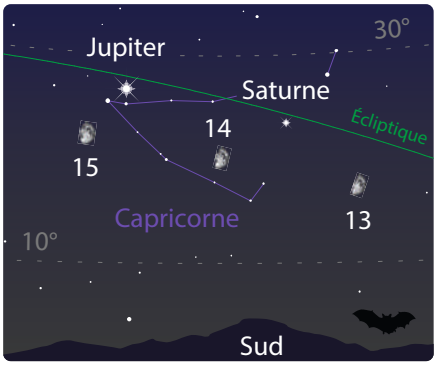
Retrouvez la carte du ciel sur sciav.fr/carteduciel

L'appli du mois

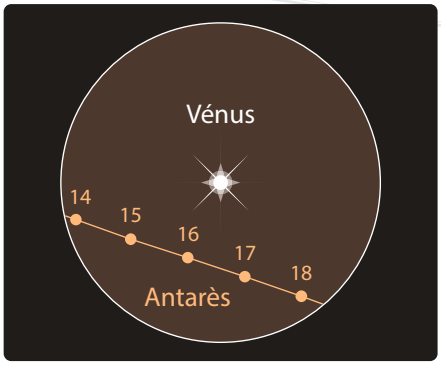
EXOPLANET est une application gratuite incluant des achats intégrés, en français et développée pour les appareils fonctionnant sous iOS. Elle vous permet d'explorer les exoplanètes connues actuellement (avec mise à jour quotidienne), leurs propriétés physiques, celles de leurs étoiles hôtes et leur localisation dans un modèle 3D de la Voie lactée.



LE SOIR DU 9, 45 MINUTES APRÈS LE COUCHER DU SOLEIL, un fin croissant de Lune enveloppé de lumière cendrée ne sera qu'à 2° de la brillante planète Vénus, bas vers le couchant.



LE SOIR DU 14, LA LUNE EN PHASE GIBBEUSE croissante formera un triangle avec les planètes Saturne et Jupiter. Nous sommes tournés vers le sud, 2 h après le coucher du Soleil.



LE SOIR DU 16, LA PLANÈTE VÉNUS ne se trouvera qu'à 1,5° d'Antarès, l'étoile la plus brillante de la constellation du Scorpion. La vue aux jumelles couvre la période du 14 au 18.

Sur notre site **sciencesetavenir.fr,** la rédaction répond à des questions scientifiques posées par nos lecteurs sur notre page **Facebook.** En voici une sélection.

NEUROLOGIE

Pourquoi dit-on que les femmes sont plus multitâches que les hommes ?

Simine C.

Cette idée proviendrait d'une étude parue en 1982. Après avoir disséqué 20 cerveaux, deux anatomistes ont conclu que le corps calleux (fibres nerveuses reliant les deux hémisphères cérébraux) est plus épais chez les femmes, d'où l'idée que cela leur permettrait d'activer plus efficacement leurs deux hémisphères simultanément. Donc d'accomplir plusieurs tâches en même temps. Or, quinze ans plus tard, une méta-analyse portant sur 2000 sujets ne révèle pas de différence significative dans l'épaisseur du corps calleux entre les deux sexes. Mieux, en 2010, deux neurobiologistes montrent que le cerveau n'est pas capable de traiter plus de deux tâches à la fois — une dans chaque lobe frontal — que l'on soit un homme ou une femme. Au-delà, le taux d'erreur devient trop important, faute d'une bonne coordination par le cerveau *(lire aussi p. 29)*. ■

Lise Loumé @LysLoume
et Rachel Mulot @RachelFleaux

ASTRONOMIE

Que se passe-t-il quand deux galaxies entrent en collision ?

Philippe D.

Lors d'une collision entre deux galaxies, il est très peu probable que des étoiles se percutent, étant donné les très grandes distances qui les séparent. En revanche, les gaz et les poussières des deux entités se mélangent et interagissent. Les forces gravitationnelles en jeu perturbent la structure même des galaxies et forment des zones de densité plus élevées qui constituent le berceau de nouvelles étoiles. ■ **Joël Ignasse** @IgnasseJ

MICHEL GUNTHER/ BIOSPHOTO

Des rapaces ont été observés propageant des feux dans la savane en se saisissant de tisons et ce afin de chasser facilement leurs proies fuyant les flammes.

ÉTHOLOGIE

Des oiseaux peuvent-ils être à l'origine d'incendies ?

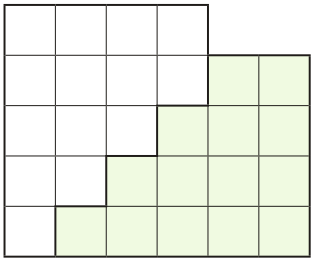
Abdelmoghit E.

En Australie ou encore en Afrique, la savane en feu attire des rapaces qui survolent par centaines les zones meurtries à la recherche d'une proie facile à saisir ou de restes d'animaux carbonisés. Dès lors on peut se demander si ces prédateurs aguerris vont jusqu'à propager eux-mêmes des incendies pour satisfaire leur quête de nourriture ? « *Nous avons recueilli des témoignages de première main décrivant le comportement de ces oiseaux parfois comme accidentel, mais plus souvent comme intentionnel* », souligne une équipe de recherche australienne dans une étude publiée en 2017. Elle note le comportement pyromane de trois espèces de rapaces : le milan noir (*Milvus migrans*), le milan siffleur (*Haliastur sphenurus*) et le faucon bérigora (*Falco berigora*). Des pompiers ont par exemple observé en Australie un milan noir se saisir, à l'aide de ses serres, d'un bâton fumant lors d'un incendie. Trop chaud : le rapace a lâché prise. Mais un autre a eu plus de succès, laissant tomber un bâton de l'autre côté de la route dans l'herbe non brûlée, qui s'est enflammée rapidement. Après avoir observé lui-même de tels agissements, Nathan Ferguson, coauteur de la recherche, est convaincu que ce comportement, qu'il réussisse ou non, est intentionnel. Mais il ignore s'il est fréquent et effectué par de nombreuses espèces. Pour lui, la propagation du feu par les rapaces devrait être sérieusement prise en compte par les autorités australiennes lors de leur gestion des incendies. En effet, ces oiseaux seraient capables de propager un incendie au-delà d'un ruisseau ou encore d'une route, ce qui peut surprendre les soldats du feu s'ils s'attendent à une propagation naturelle. ■

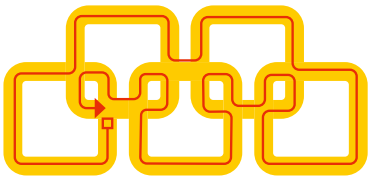
Anne-Sophie Tassart @TassartAS

Solutions des jeux parus dans « Sciences et Avenir-La Recherche » n° 895, septembre 2021

Découpage miroir



Un parcours très olympique



Les centimes du boulanger

Les 100 kg de pain à 24 centimes coûteront 2400 centimes. Or si l'on prenait ces 100 kg à 23 centimes seulement, ils ne coûteront que 2300 centimes, soit 100 centimes de moins. Mais chaque kilo à 27 centimes, que l'on prendra à la place d'un kilo à 23 centimes comblera de 4 centimes ce déficit de 100 centimes. Divisons ces 100 centimes par 4 pour savoir combien de kilos à 27 centimes sont nécessaires pour que le déficit soit comblé : nous trouvons qu'il faut prendre 25 kg à 27 centimes et par conséquent 100–25 = 75 kg à 23 centimes.

Vérification: 25 kg à 27 centimes valent 675 centimes, 75 kg à 23 centimes valent 1723 centimes. Au total : 100 kg reviennent à 2400 centimes.

Benjamin Disraeli croise Gaston Bachelard

« Être conscient que l'on est ignorant est un grand pas vers le savoir. »

Les 3 se mettent en 5

(3–3)x333 = 0
3/3+3x(3–3) = 1
3–3+(3+3)/3 = 2
3+3–3+3–3 = 3
3+3/3+3–3 = 4
3+3/3+3/3 = 5
3+3+3x(3–3) = 6
(33–3)/3–3 = 7
(33–3x3)/3 = 8
3x3+3x(3–3) = 9
3+3+3+3/3 = 10
33/3+3–3 = 11
3x3+3+3–3 = 12
(33-3)/3+3 = 13
(33+3x3)/3 = 14
3+3+3+3+3= 15

Une formidable diversité

11 fois par an, l'actualité des savoirs pour tous

N° 887
La fin de l'Univers

N° 888
Vaincre le stress

N° 889
La solution hydrogène

N° 890
Microbiotes

N° 891
Découvrir les confins de l'Univers

N° 892
Vaccins contre le cancer

N° 893/894
100 trésors scientifiques

N° 895
Explorer l'espace

Bon de commande

Je commande les numéros ci-après au prix de : **7 €** par numéro payable par chèque à l'ordre de *Sciences et Avenir* (port compris pour la France). Bon de commande à retourner à :

Sciences et Avenir
service des abonnements
45 av. du Général-Leclerc 60643 Chantilly Cedex

❑ N° 887 ❑ N° 888 ❑ N° 889 ❑ N° 890
❑ N° 891 ❑ N° 892 ❑ N° 893/894 ❑ N° 895

Nom : . . . . . .
Adresse : . . . . . .
. . . . . Ville : . . . . . .
Code postal : . . . . . .

PAR PIERRE BERLOQUIN

Énigmes, logique et mathématiques

Retrouvez chaque mois des problèmes ludiques pour solliciter votre curiosité. Solutions dans le prochain numéro.

Neuf chiffres exactement

Les neuf chiffres sont répartis dans cette addition pour qu'elle soit exacte.
Saurez-vous les répartir de trois autres manières au moins pour obtenir chaque fois une addition exacte ?

	3	2	7
+	6	5	4
=	9	8	1

	.	.	.
+	.	.	.
=	.	.	.

	.	.	.
+	.	.	.
=	.	.	.

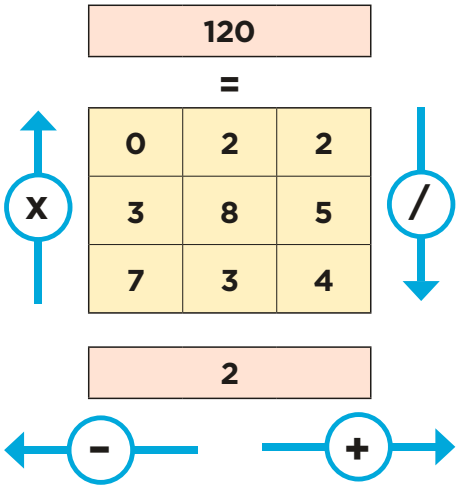
	.	.	.
+	.	.	.
=	.	.	.

Rêves de voitures

Quatre amis, Alain, Baudoin, César et Damien, fantasment sur la voiture qu'ils vont s'offrir pour le nouvel an :
– Je voudrais, dit Alain, un cabriolet jaune avec intérieur cuir, des jantes alu et une assistance au stationnement.
– Pour moi, envisage Baudoin, ce sera un break bleu, des sièges en tissu, des roues à jante large et l'assistance au stationnement.
– En ce qui me concerne, dit César, il me faudrait une berline blanche, des sièges en velours, des roues à rayons et l'assistance au stationnement.
– Enfin, Damien envisage un coupé noir, des sièges en Alcantara, des roues également noires et une caméra de recul.
Alain s'est entremis et a obtenu du concessionnaire une importante ristourne à condition que les quatre voitures achetées soient absolument identiques.
Est-ce possible en respectant au moins un souhait de chacun ?

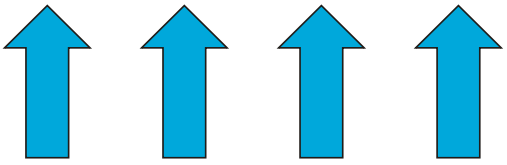
Chemin arithmétique

Cheminez dans les cases jaunes pour aller de 2 à 120.
On multiplie en allant vers le haut, on divise en allant vers le bas, on additionne en allant vers la droite et on soustrait en allant vers la gauche.
Il n'est pas obligatoire de passer par toutes les cases mais elles peuvent être utilisées plusieurs fois.



Quatre flèches en une

Comment disposer ces quatre flèches pour en créer une cinquième ?



Logique lettriste

Certaines lettres sont rouges et d'autres sont bleues. Saurez-vous rougir une lettre et en bleuir une autre selon la même logique ?

Il allait de la porte capitonnée à la baie vitrée, donnant sur un jardin aux arbres bourgeonnants, passant et repassant devant moi, en double exemplaire, à cause du miroir, me flanquant le vertige avec ses évolutions dansantes et sa faconde de camelot maladroit.

Énigmes Créalude, Pierre Berloquin, Jean-Thierry Garrigues

LE COFFRET LE CHAT de Philippe Geluck

LE COFFRET **35 €**

Retrouvez l'univers du *CHAT* dans cette édition originale limitée.

plus de 600 pages de gags !

Ce coffret de 3 volumes regroupe 7 albums :
LA BIBLE SELON LE CHAT (Livre premier et Livre second)
LE CHAT PASSE À TABLE (Il n'y a pas un Chat et Le Chat est parti)
LE CHAT FAIT DES PETITS (Les desseins du Chat, Préchi-préchat et Le Scrabble du dimanche)

Format du coffret 230 × 160 × 60 mm.

BON DE COMMANDE

À retourner accompagné de votre règlement à : L'Obs – Le Chat – 67/69 avenue Pierre Mendès-France – CS 51402 – 75647 Paris cedex 13.

	Référence	Qté	Prix	TOTAL
Le coffret *Le Chat*	19622		**35 €**	**€**
Frais de participation aux frais d'envoi				**+ 1 €**
Total de ma commande				**€**

• Délai de livraison 2 semaines maximum • Offre valable en France métropolitaine.

❑ Je règle par CHÈQUE à l'ordre de : L'OBS

ADRESSE DE LIVRAISON :

☐ Mme ☐ M.

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

_____

Code Postal : ⌊_⌊_⌊_⌊_⌊_⌋ Ville : _____

Offre valable en France métropolitaine jusqu'au 31 décembre 2021. En retournant ce formulaire, vous acceptez que l'Obs, responsable de traitement, utilise vos données personnelles pour les besoins de votre commande, de la relation Client et d'actions marketing sur ses produits et services. Pour connaître les modalités de traitement de vos données ainsi que les droits dont vous disposez (accès, rectification, effacement, opposition, portabilité, limitation des traitements, sort des données après décès), consultez notre politique de confidentialité à l'adresse http/www.nouvelobs.com/donnees-personnelles.php ou écrivez à notre Délégué à la protection des données – 67/69 avenue Pierre Mendès-France – 75647 Paris cedex 13 ou dpo@groupelemonde.fr

BETC ORANGINA SCHWEPPES FRANCE SAS – RCS Nanterre B 404 907 941 – CAPITAL SOCIAL 446 036 924 €

POUR VOTRE SANTÉ, ÉVITEZ DE MANGER TROP GRAS, TROP SUCRÉ, TROP SALÉ – WWW.MANGERBOUGER.FR